



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOONAS LEHTONEN
VALUMUURIEN KORJAUSLAASTIEN PAKKASENKESTÄVYYDEN
KEHITTÄMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Pentti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
taneuvoston kokouksessa 9. maalisi-
kuuta 2016

TIIVISTELMÄ

JOONAS LEHTONEN: Valumuurien korjauslaastien pakkasenkestävyyden kehittäminen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 79 sivua, 16 liitesivua

Syyskuu 2016

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Matti Pentti

Avainsanat: valumuuri, korjauslaasti, hydraulinen kalkki, pakkasenkestävyys

Valumuurirakenteiden korjaaminen ns. syvätäyttömenetelmällä on aloitettu Suomessa 1970-luvulla. Korjauksissa käytettyjä laasteja on kuitenkin tutkittu melko vähän. FT Thorborg von Konow teki tuoreen laastin kokeita, mutta etenkin kovettuneen ja rakenteessa olleen laastin tutkimukset ovat jääneet vähäisiksi. Viimeisimmissä valumuurien laastisaumojen kuntotutkimuksissa on kuitenkin havaittu, nykyään yleisimmin historiallisten valumuurien korjauksissa käytetyn, hydraulisella kalkilla vahvistetun kalkkilaastin pakkasenkestävyyden olevan osin puutteellinen.

Diplomityö on jaettu kahteen osaan: Kirjallisuustutkimuksen perusteella perehdytään aiheeseen ja selvitetään valumuurien historiaa niin rakentamisen kuin korjausten osalta. Lisäksi selvitetään erilaisten laastien yksittäisten ainesosien merkitys laastissa. Kirjallisuustutkimuksen ja diplomityön toimeksiannon perusteella kokeelliseen tutkimukseen on valittu nykyään historiallisten valumuurien muurinkorjauksissa yleisimmin käytetty hydraulisella kalkilla vahvistettu kalkkilaasti. Kokeellisen tutkimuksen pääpaino on kehittää laastin pakkasenkestävyysominaisuuksia, joihin pyritään vaikuttamaan erilaisilla lisäaineilla.

Kokeellisessa tutkimuksessa tehtiin sarja laastikokeita eri laastien ominaisuuksien määrittämiseksi. Referenssilaastiksi valittiin Olavinlinnan muurinkorjaustyömaalla käytettävä laasti. Kokeissa referenssilaastia modifioitiin erilaisilla historiallisilla lisäaineilla sekä nykyaikaisilla teollisilla huokostimilla. Näissä modifioiduissa laastiresepteissä referenssilaastiin eroa oli vain lisäaineiden käyttö. Lisäksi tehtiin erillinen laastierä, jossa käytettiin valmiiksi tehtyä kalkkilaastia, johon laboratoriossa sekoitettiin hydraulinen kalkki. Kaikille laasteille tehtiin samat laastikokeet. Tässä tutkimuksessa referenssilaastin pakkasenkestävyys todettiin puutteelliseksi, mikä tukee aiemmin tehtyjen kuntotutkimusten havaintoja.

Modifioitujen laastien ominaisuuksia verrattiin referenssilaastin vastaaviin, ja näin voitiin vertailla lisäaineiden vaikutusta laastin ominaisuuksiin. Tutkimuksen perusteella hydraulisella kalkilla vahvistetun kalkkilaastin pakkasenkestävyyttä voidaan parantaa lisäaineiden avulla. Kokeiden perusteella pakkasenkestävyyden suhteen toimivimmaksi lisäaineeksi osoittautui synteettinen huokostin MasterAir 102. Huokostinta lisättiin laastiin 0,09 p-% sideaineen painosta. Laastiresepti ja sekoitusohjeet on esitetty tämän diplomityön lopussa. Huokostimen avulla laastiin saatiin lisättyä pakkasenkestävyyden kannalta välttämättömiä suojahuokoskokoluokan ilmahuokosia, ja laasti todettiin kokeiden avulla pakkasenkestäväksi. Ilmahuokosten lisäyksen seurauksena laastin lujuus pieneni hieman, mutta valumuureissa laasti ei kanna kuormia, joten lujuutta tärkeämpi ominaisuus on pakkasenkestävyys.

ABSTRACT

JOONAS LEHTONEN: Development of repair mortars frost resistance for natural stonewalls

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 79 pages, 16 Appendix pages

September 2016

Master's Degree Program in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Matti Pentti

Keywords: natural stonewall, repair mortar, hydraulic lime mortar, frost resistance

The current form of repairing natural stone walls has been started in Finland in the 1970s. However mortars used in repairs hasn't been researched too much. PhD Thorborg von Konow did some fresh mortar tests but hardened mortar has got less attention. The latest inspection of the current condition of mortar joints has shown that the most commonly used mortar has lack of frost resistance.

The thesis is divided into two parts. Based on the literature one take a look on the topic and find out the history of construction and repairs of natural stonewalls. In addition to explaining the importance of individual ingredients of various mortars. Based on literature research and assignment of this thesis hydraulic lime mortar was chosen to experimental research. Hydraulic lime mortar is the most commonly used mortar on historic stonewall repairs in Finland. The main focus of experimental research was to develop the frost resistance of the hydraulic lime mortar. Frost resistance was improved by various additives.

A series of tests was made in the experimental research to measure various properties of different mortars. The reference mortar was picked from worksite of Olavinlinna. Tests showed that frost resistance of the reference mortar was insufficient. The result was consistent with the conclusion of latest inspections of the condition of mortar joints. The reference mortar was modified with both historical and modern additives. Only difference between reference mortar and modified mortar recipes was the use of the additive. In addition one badge of mortar was made from pre-made lime mortar, where hydraulic lime was added in the laboratory.

All the test results of modified mortars was compared to reference mortar. This showed how different additives effect on the properties of different mortars. Based on this research, frost resistance of hydraulic lime mortar can be improved with additives. Test results showed that most efficient additive was air entraining agent MasterAir 102. It only took 0,09 w-% MasterAir 102 from adhesive weight to make a frost resistant mortar. Mortar recipe and mixing instructions are shown at the end of this thesis. Small air pores which are necessary to frost resistance was added to mortar with the air entraining agent. Strength of the mortar decreased slightly because the quantity of the air was grown. However mortar doesn't carry any loads in natural stone walls so frost resistance is more crucial than strength.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy:ssä vuonna 2016. Tutkimuksen tuloksia on tarkoitus hyödyntää tulevissa Turun linnan korjauksissa.

Haluan kiittää kaikkia henkilöitä ja tahoja, jotka ovat minua tutkimuksen eri vaiheissa auttaneet. Erityiskiitokset haluan esittää Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy:n DI Ari Lepäniemelle ja DI Pekka Kokolle, joilta olen saanut ohjeita ja neuvoja työn joka vaiheessa, Arille kiitokset myös työn välitarkastuksista. Kiitokset kommenteista ja parannusehdotuksista myös Senaatti-kiinteistöjen Janne-Pekka Niiniselle ja Selja Flinkille.

Laastikokeita varten materiaaleja sain Olavinlinnan muurinkorjaustyömaalta, Semtu Oy:ltä ja Hyvinkään Betoni Oy:ltä, kiitokset siis heille. Kiitokset myös työvälineiden ja laboratoriotilojen lainaamisesta TTY:n rakennustekniikan laitokselle. TTY:n henkilökunnasta apua ja ohjeita sain käyttöinsinööri Tomi Stranderilta ja tohtorikoulutettavilta Toni Pakkalalta sekä Arto Koliöltä, kiitos.

Tampereella, 21.9.2016

Joonas Lehtonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	VALUMUURIT	3
2.1	Valumuurien rakenne	3
2.2	Valumuurien vaurioituminen	5
2.3	Valumuurikohteet Suomessa	6
2.4	Valumuurien korjausten historia Suomessa	6
2.4.1	Käytössä olevat korjauslaastit	7
2.4.2	Käytössä olevat korjaustekniikat	8
2.4.3	Vanhojen suojeltujen rakennusten korjaus – yleistä	11
2.5	Aiemmin tehdyt valumuuritutkimukset ja havainnot	11
2.5.1	Suomenlinna	12
2.5.2	Olavinlinna	12
2.5.3	Turun linna	13
2.5.4	Yhteenveto tutkimuksista	14
3.	LAASTIT - YLEISTÄ	15
3.1	Laastin ainesosat	15
3.1.1	Sideaine	15
3.1.2	Runkoaine	19
3.1.3	Vesi	20
3.1.4	Lisäaineet	20
3.2	Laastityypit	24
3.2.1	Kalkkilaastit (K)	24
3.2.2	Sementtilaastit (S)	25
3.2.3	Kalkkisementtilaastit (KS)	25
3.2.4	Hydraulisella kalkilla vahvistetut kalkkilaastit (KKh)	26
4.	KÄYTTÖOLOSUHTEIDEN JA TYÖTAPOJEN VAIKUTUS LAASTIEN TOIMINTAAN	27
4.1	Korkeat ja alhaiset lämpötilat – suojaukset	27
4.2	Laastien kovettumisnopeus eri lämpötiloissa	28
4.3	Laastin pumppaus/sullonta	28
4.4	Jälkihoito ja sen vaikutus	29
5.	KOKEELLISET TUTKIMUKSET	30
5.1	Tutkimuksen taustaa ja tavoitteet	30
5.2	Tutkimuksen valmistelu	30
5.3	Tutkitut laastit	31
5.3.1	KKh-referenssilaasti	31
5.3.2	Modifioitu referenssilaasti	31
5.3.3	Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki	32
5.4	Kokeiden kulku	33
5.4.1	Laastin valmistus Hobart-sekoittimella	34

5.4.2	Leviämä.....	35
5.4.3	Ilmapitoisuus ja tilavuuspaino	36
5.4.4	Sekoitusvesimäärä.....	37
5.4.5	Laastin työstettävyys ja pumpattavuus	38
5.4.6	Koeprismojen huokoisuusarvot.....	38
5.4.7	Jäädytys-sulatuskoe.....	40
5.4.8	Koeprismojen lujuus	41
5.4.9	Huokosrakenne ohuthienäytteen perusteella.....	42
5.5	KKh-referenssilaastin ominaisuuksien mittaukset.....	42
5.5.1	Tuoreen laastin ominaisuudet	43
5.5.2	Laastin työstettävyys ja pumpattavuus	43
5.5.3	Koeprismojen huokoisuusarvot.....	44
5.5.4	Jäädytys-sulatuskoe.....	44
5.5.5	Koeprismojen lujuus	45
5.5.6	Huokosrakenne ohuthienäytteen perusteella.....	46
5.6	KKh-referenssilaastin modifiointi ja ominaisuuksien mittaus.....	47
5.6.1	Tuoreen laastin ominaisuudet	49
5.6.2	Laastin työstettävyys ja pumpattavuus	50
5.6.3	Koeprismojen huokoisuusarvot.....	51
5.6.4	Jäädytys-sulatuskoe.....	52
5.6.5	Koeprismojen lujuus	54
5.6.6	Huokosrakenne ohuthienäytteen perusteella.....	55
5.6.7	Kovettuneesta laastista liukenevat aineet.....	56
5.7	Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki, ominaisuuksien mittaus.....	56
5.7.1	Tuoreen laastin ominaisuudet	58
5.7.2	Laastin työstettävyys ja pumpattavuus	59
5.7.3	Koeprismojen huokoisuusarvot.....	59
5.7.4	Jäädytys-sulatuskoe.....	60
5.7.5	Koeprismojen lujuus	62
5.7.6	Huokosrakenne ohuthienäytteen perusteella.....	63
6.	KOETULOSTEN VERTAILU JA JOHTOPÄÄTÖKSET	64
6.1	Teollisella huokostimella modifioidut laastit.....	64
6.2	Historiallisilla lisäaineilla modifioidut laastit	65
6.3	Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki	65
7.	KOETULOSTEN PERUSTEELLA OHJEET MUURINKORJAUSLAASTISTA.....	67
7.1	Koostumus.....	67
7.2	Sekoitusohjeet	67
8.	LISÄTUTKIMUSTARVE.....	69
	LÄHTEET.....	70

LIITE A: Olavinlinnan laastireseptit

LIITE B: Olavinlinnan hiekkojen rakeisuuskäyrät

LIITE C: Ohuthietutkimusten tulokset

LIITE D: Laastikokeiden tulokset

LYHENTEET JA MERKINNÄT

KKh-laasti	Laasti, jossa sideaineena on sekä ilmakalkkia että hydraulista kalkkia
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
<i>b</i>	standardin SFS-EN 1015-10 mukaisen prismamuotin sisämitan leveys
<i>d</i>	standardin SFS-EN 1015-10 mukaisen prismamuotin sisämitan korkeus
<i>f</i>	taivutuslujuus, yksikkönä N/mm ² eli MPa
<i>f_m</i>	puristuslujuus, yksikkönä N/mm ² eli MPa
<i>C</i>	kapillaarinen vedenimukerroin
<i>M0</i>	koekappaleen kuivapaino
<i>M1</i>	koekappaleen paino 10 minuutin kapillaari-imun jälkeen
<i>M2</i>	koekappaleen paino 90 minuutin kapillaari-imun jälkeen
<i>M3</i>	koekappaleen paino 24 tunnin kapillaari-imun jälkeen
Huokostin	Laastiin lisättävä lisäaine, jonka tarkoitus on lisätä laastiin pakkasenkestävyyden kannalta välttämättömiä suojahuokoskokoluokan ilmahuokosia.
Hydraulinen kalkki	Hydraulinen kalkki on aina kuivasammutettua. Hydraulinen kalkki kovettuu (hydratoituu) veden kanssa. Kovettuminen tapahtuu samantyyppisesti kuin sementillä, tosin hitaammin ja loppulujuus on pienempi.
Ilmakalkki	Ilmakalkki kovettuu reagoidessaan kostean ilman hiilidioksidin kanssa eli se kovettuu karbonatisoitua. Ilmakalkki ei voi kovettua vedessä.
Ilmapitoisuus	Kuvaa kuinka monta prosenttia tuoreen laastin tilavuudesta on ilmaa. Ilmapitoisuus määritetään tässä työssä standardin SFS-EN 1015-7 mukaisen painemenetelmän avulla.
Kapillaarinen vedenimukerroin	Kertoo kuinka paljon kovettunut laasti imee itseensä vettä kapillaari-imussa. Korjauslaasteilla ilmoitetaan yksikössä kg/m ² , muilla laasteilla yksikkö kg/m ² min ^{0,5} .
Kapillaari-imeytispitoisuus	Kuvaa laastin kapillaarihuokoisuutta, eli kuinka paljon laasti pystyy imemään itseensä vettä normaalipaineessa vesiupotuksessa.
Kapillaaripaino	Näytteen paino kun kapillaarisesti täyttyvät huokokset ovat täynnä vettä.
Kuivapaino	Näytteen paino kun näyte ei sisällä lainkaan vettä.
Laastierä	Tässä tutkimuksessa laastierällä tarkoitetaan samoilla ainesosilla ja –suhteilla valmistettuja laasteja. Yhden laastierän laastit ovat keskenään yhtenevät, vaikka niitä ei olisi valmistettu yhdellä kerralla.
Laastiprisma	Standardin SFS-EN 1015-10 mukainen näytekappale (40x40x160 mm ³)
Leviämä	Standardin SFS-EN 1015-3 mukaisen iskupöytäkokeen avulla määritetty tuoreen laastin leviämän arvo, joka kuvaa tuoreen laastin notkeutta.

Märkäkalkki	Kuivasammutetun kalkkijauheen ja veden seos. Märkäkalkkia pitää muhittaa vähintään kuukausi ennen sen käyttöä.
Ohuthe	Hyvin ohut, noin 0,025 mm, valoa läpäisevä näyteleike
Ominaispaino	Eli tilavuuspaino, kuvaa laastin painoa tilavuusosaan nähden.
Pakkasrasitettu näyte	Laastiprisma, joka on ollut jäädytys-sulatuskokeessa 50 sykliä.
Puristuslujuus	Kappaleen lujuus puristusta vastaan, yksikkö N/mm^2 eli MPa. Määritetään puristamalla kappale murtoon asti.
Sekoitusvesimäärä	Kuvaa kuinka monta painoprosenttia laastin kokonaispainosta on vettä.
Sintraantuminen	Aineen kiinteyttäminen sulamislämpötilaa pienemmässä lämpötilassa.
Suojahuokossuhde	Kapillaarisesti täyttymättömien huokosten osuus kokonaishuokostilavuudesta.
Taivutuslujuus	Eli taivutusvetolujuus, yksikkönä on N/mm^2 eli MPa. Kuvaa kappaleen kykyä kestää taivutusta murtumatta. Määritetään taivuttamalla laastiprisma poikki keskikohdastaan.
Tyhjöpaino	Näytteen paino kun näytteen kaikki huokokset ovat täynnä vettä.
Vertailunäyte	Laastiprisma, joka ei ole ollut pakkasrasituksessa. Näytettä on jälkihoidon jälkeen säilytetty vesiupotuksessa.

1. JOHDANTO

Valumuurirakenteiden korjaaminen ns. syvätäyttömenetelmällä on aloitettu Suomessa 1970-luvulla. Korjauksissa käytettyjä laasteja on kuitenkin tutkittu melko vähän. Kehittäessään hydraulisella kalkilla vahvistettua kalkkilaastia FT Thorborg von Konow teki kyllä tuoreen laastin kokeita, mutta kovettuneen ja rakenteessa olleen laastin tutkimukset ovat jääneet vähäisiksi. Viimeisimmissä valumuurien laastisaumojen kuntotutkimuksissa on kuitenkin havaittu KKh-laastin pakkasenkestävyyden olevan osin puutteellinen, sillä ko. laastilla viime vuosina korjatuista kohteista otettujen laastinäytteiden ohuthietutkimusten mukaan laastin ilmahuokokset jakautuvat epätasaisesti aiheuttaen paikallista vaihtelua laastin pakkasenkestävyyteen. Osassa laastinäytteistä oli havaittavissa myös merkkejä alkavasta pakkasrapautumasta alueilla, joiden korjaamisesta on aikaa viisi vuotta.

Valumuureissa laasti ei kannu kuormia, vaan sen merkitys on enemmänkin suojaava. Laastin tulee täyttää kaikki kivien väliset raot ja onkalot, ja estää näin vesitaskujen syntyminen muurin sisäosissa sekä torjua veden pääsyn rakenteeseen muurin pinnalla. Jotta laasti voi täyttää sille asetetut vaatimukset, tulee sen pysyä vaurioitumattomana kaikissa olosuhteissa.

Suurin yksittäinen laastia vaurioittava tekijä on pakkasrapautuminen, tämän vuoksi kaikilta Suomessa käytettäviltä laasteilta vaaditaankin hyvää pakkasenkestävyyttä. Pakkasenkestävyyden kannalta on tärkeää, että laastissa on riittävästi ja tasaisesti jakautuneena suojahuokoskokoluokan ilmahuokosia. Nykyään on saatavilla laastin pakkasenkestävyyttä parantavia lisäaineita, jotka käytännössä tuottavat laastiin tarvittavan määrän oikeankokoisia ilmahuokosia.

Laastin pakkasenkestävyyttä voidaan tutkia laastiprismojen avulla usean eri standardin mukaisen kokeen avulla. Pelkästään laastin kapillaarisesti täyttymättömien huokosten osuutta kuvaavan suojahuokossuhteen avulla voidaan arvioida pakkasenkestävyyttä. Suojahuokossuhteen perusteella ei kuitenkaan pystytä varmistamaan pakkasenkestävyyttä. Jäädytys-sulatuskokeessa laastiprismat altistetaan pakkasrasitukselle, jolloin pakkasenkestävyys voidaan varmistaa käytännön kokeen avulla. Kokeessa osa laastiprismoista altistetaan jäädytys-sulatusrasitukselle ja osa laastiprismoista on rasittamattomia vertailuprismoja. Kokeen lopuksi kaikkien prismojen taivutuslujuudet mitataan, ja mikäli pakkasrasitettujen prismojen lujuudet ovat yli 2/3 vertailunäytteiden lujuuksista, voidaan laasti todeta pakkasenkestäväksi. Varmistuksena pakkasenkestävyydelle laastiprismoista voidaan vielä teettää ohuthieet. Ohuthietutkimuksessa näytteestä valmistetaan noin 0,025

mm paksu, valoa läpäisevä näyteleike, jota tutkitaan polarisaatiomikroskoopilla. Mikroskoopin avulla saadaan määriteltyä tarkasti pakkasenkestävyyden kannalta tärkeä huokosrakenne.

Tämä tutkimus on jaettu kahteen osaan, kirjallisuustutkimukseen ja kokeelliseen tutkimukseen. Kirjallisuustutkimuksen perusteella selvitetään valumuurien historiaa niin rakentamisen kuin korjausten osalta. Lisäksi selvitetään erilaisten laastien yksittäisten ainesosien merkitys laastissa. Kirjallisuustutkimuksen ja tämän diplomityön toimeksiannon perusteella kokeelliseen tutkimukseen on valittu vain nykyaikaisissa muurinkorjauksissa yleisimmin käytetty hydraulisella kalkilla vahvistettu kalkkilaasti, KKh-laasti. Kokeellisen tutkimuksen pääpaino on kehittää laastin pakkasenkestävyysominaisuuksia. Pakkasenkestävyyteen pyritään vaikuttamaan erilaisilla lisäaineilla. Laastista tehdään useampi eri variaatio, joissa osassa käytetään kirjallisuudesta löytyneitä historiallisia lisäaineita ja osassa nykyaikaisia lisäaineita. Kaikkien valmistettujen laastierien pakkasenkestävyys tutkitaan ja lopputuloksena saadaan yksiselitteinen resepti pakkasenkestävän muurinkorjauslaastin valmistamiseksi.

2. VALUMUURIT

Suomessa rakennetut luonnonkivimuurit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: laastittomat muurit, harkkokivimuurit ja valumuurit. Laastittomissa muureissa ei nimensä mukaisesti käytetty laastia lainkaan. Kestävän muurin aikaansaamiseksi kiviä työstettiin voimakkaasti, jotta ne sopivat yhteen niin hyvin, että muuri pysyi pystyssä ilman laastia. [2]

Harkkokivimuureja, eli rustika muureja, käytettiin yleisesti 1800-luvulla kartano- ja kaupunkirakentamisessa. Harkkokivimuurin julkisivupinta koostuu suorakulmion muotoon työstetyistä kivistä, jossa kivien väliset sileät saumat erottuvat selvästi. [2]

Valumuurien rakennetta on esitetty tarkemmin seuraavassa kappaleessa. Suomessa valumuuritekniikalla toteutettuja luonnonkivimuureja on rakennettu aina keskiajalta 1900-luvun alkupuolelle. Pääosin valumuureja käytettiin linnoitus- ja kirkkorakentamisessa, mutta myös muita sovellutuksia löytyy kuten sillat, makasiinit, kivijalat, aidat yms. [1]

2.1 Valumuurien rakenne

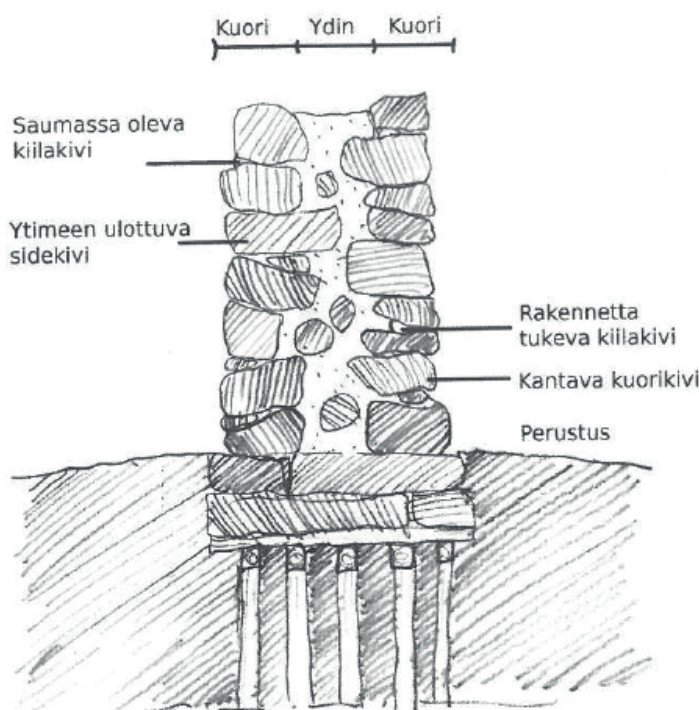
Valumuurit perustettiin maahan kaivettuun ojaan ja perustamissyvyys valittiin maaperän mukaan. Tarvittaessa perustukset tuettiin puisella arinarakenteella ja tukipaaluilla. Ojaan ladottiin ensin laastiton kiviladelma, jonka päälle varsinainen valumuuri voitiin rakentaa. [7]

Valumuurit koostuvat kantavista kuorista ja kuormittamattomasta ytimeistä. Perustamistöiden jälkeen valumuurit rakennettiin yleensä kerroksittain. Kuorimuurit ladottiin tiettyyn korkeuteen, tyypillisesti noin metrin korkeuteen, jonka jälkeen ydin valettiin täyteen laastia ja kiviä. Tästä tulee muurin nimitys valumuuri. [2] Valumuurin kokonaispaksuus voi olla useita metrejä, esimerkiksi Olavinlinnan Paksun bastionin valumuuri on alaosaan kuusi metriä paksu [1]. Pienimmilläänkin valumuurin paksuus on yleensä metrin luokkaa [7].

Valumuurien sisä- ja ulkopinnan kuorimuurit ovat tyypillisesti noin 20–60 cm paksuiset kiviladelmat [2]. Kuorimuurit toimivat samalla muurin kantavana rakenteena ja muottina ytimen valamisessa. Kuorimuurien kivet tasapainotettiin kiilakivien avulla siten, että jokaisella kivellä oli vähintään kolme tukipistettä. Näin muurista saatiin vankka. Kivet pyrittiin limittämään, jottei rakenteeseen muodostu rakenteellisesti heikkoja yhtenäisiä pitkiä pystysaumoja. Kuoreen laitettiin myös säännöllisin välein sidekiviä, jotka ulottuivat kuoresta ytimeen ja näin ne sitoivat kuoret ja ydinkerroksen toisiinsa. [1]

Valumuurien ydin koostuu kivistä ja laastista. Laasti sullottiin muurin keskiosaan, ja samalla keskiosa täytettiin kivillä siten, että myös ytimessä kivet ovat kiveä vasten. Näin

saatiin säästettyä kallista laastia ja kuorimuriin sopimattomat kivet saatiin käytetyksi ytimen täytekinä. Kiviä ja laastia sullottiin ytimeen niin paljon, että laasti alkoi pursuaan kuorimuurin ulkopinnalta kivien saumoista ulos. Samalla kuorimuurin saumoihin lyötiin ulkoapäin kiilakiviä niin paljon kuin mahdollista. Rakennusmateriaalien saatavuudesta johtuen paikoin kiila- ja täytekinä saatettiin käyttää myös muita materiaaleja kuten tiiltä. Tyypillisin valumuurin rakennustapa oli, että laastia ja kiviä sullottiin ytimeen yhtä aikaa, mutta joskus muurin ydin saatettiin täyttää löysemmällä laastilla vasta kun kuoret ja kiviäydin olivat valmiiksi ladottu. [1] Kuvassa 2.1 on esitetty valumuurin rakenneleikkaus. Rakenneleikkauksesta käy ilmi mitä eroa on edellä mainituilla muurin kuorella ja ytimellä sekä miten kantava kuorikivi ja ytimeen ulottuva pidempi sidekivi eroavat toisistaan. Leikkauksessa on hahmoteltu myös rakennetta tukevat ja sauman ulkopintaan lyötävät kiilakivet.



Kuva 2.1 Valumuurin rakenneleikkaus [1]

Laastilla ei valumuurissa ole kantavaa merkitystä. Luonnonkiven puristuskestävyys voi olla monikymmenkertainen verrattuna laastiin, joten kestävämmän rakenteen aikaansaamiseksi laasti ei kannata kuormia. Laastin merkitys valumuurissa on enemmänkin suojaava. Laasti täyttää kaikki kivien väliset raot ja tyhjätilat, jolloin se antaa muurille pitkäaikaiskestävyyttä sään vaikutuksen alaisena. Laasti estää näin vesitaskujen syntymisen muurin sisäosissa ja torjuu veden pääsyä rakenteeseen muurin pinnalla. [2] Laastit koostuvat kolmesta pääainesosasta, jotka ovat: runkoaine, sideaine ja vesi sekä lisäksi mahdollisista lisäaineista. Alkuperäisissä laasteissa sideaineena on käytetty kalkkia [1]. Laasteihin paneudutaan tarkemmin tämän diplomityön myöhemmässä vaiheessa.

2.2 Valumuurien vaurioituminen

Suurin yksittäinen muurien vaurioitumiseen johtava syy on vaakaroutuminen. Vaakaroutimisella tarkoitetaan ilmiötä, jossa rakenteeseen päässyt vesi jäätyy. Vesi laajenee jäätyessään noin 9 %. Rakenteen sisällä oleva vesi on tiiviisti rakennusaineen reunoja vasten, jolloin veden jäätyessä ympäröivään rakennusaineeseen syntyy painetta. Pystysuunnassa jäätyvän veden laajeneminen ei ole yhtä suuri ongelma, koska vesi ei ole pystysuunnassa yhtä tiiviisti rakennusaineen ympäröimä. Jäätymisestä syntyvä paine työntää ympärillä olevia rakenteen osia irti toisistaan synnyttäen rakenteeseen koloja. Kun vesi jäätyy ja sulaa monta kertaa, paineen synnyttämä kolo levenee jatkuvasti, kunnes vaurio on selvästi havaittavissa. Vaurio ei ilmene välttämättä niin selvästi vielä talvella, koska jää pitää rakennetta kasassa, mutta keväällä kun jää sulaa lopullisesti niin vaurio voi ilmetä muurin pullistumana tai pahimmassa tapauksessa paikallisena sortumana. [2]

Muurin sisään päässyt vesi vaurioittaa aina rakennetta. Pelkkä veden virtaamisen aiheuttama eroosio voi huuhtoa sideaineen pois, etenkin muurin saumoissa. [7] Lisäksi vesi voi aiheuttaa muurissa käytetyissä laasteissa pakkasrapautumista. Laastit eivät välttämättä ole pakkaskestäviä, jolloin laastiin päässyt vesi rapauttaa laastin jäätyessään. Kun laastin rapautuminen etenee tarpeeksi pitkälle, sideaine murenee pois ja jäljelle jää ainoastaan hiekkaa. Muurin sisällä vapaana oleva hiekka ja kivet aiheuttavat painetta kuorien kivilaidelmille, jolloin ne saattavat pullistua tai pahimmassa tapauksessa sortua paikallisesti. [2]

Syitä siihen miksi vesi pääsee muuriin sisään voi olla monia. Muurin vesikate saattaa vuotaa. Muurin lämpöliikkeet voivat aiheuttaa rakenteeseen hiushalkeamia. Säänkestämättömät saumalaastit saattavat rapautua ajan saatossa. Muurin pinnassa saattaa olla vettä kerääviä vaakahyllyjä tai kasvillisuutta, jopa puita. Vesi saattaa nousta rakenteeseen kapilaarisesti maaperästä. Yhteistä vaurioitumisen mahdollistamiselle on se, että rakenteeseen syntyy halkeamia tai muita reittejä, joista vesi pääsee rakenteeseen. [2]

Lisäksi muurit kärsivät erilaisista mekaanisista vaurioista. Muurien kallistuminen ja muureissa esiintyvät suuret pystysuuntaiset halkeamat johtuvat useimmiten perustusten pettämisestä. Perustusmaan kosteuden muutokset ja veden liikkeet maakerroksissa aiheuttavat maakerrosten painumia ja muuria tukevien puurakenteiden lahoamista. Perustusten vaurioituminen voi edetä hyvinkin nopeasti, esimerkiksi pohjavedenpinnan laskeminen tuhoaa hirsiarinan muutamassa vuodessa. [7]

Mekaanisia vaurioita muureille aiheuttavat myös erilaisten kaivantojen, täyttöjen ja sortumien aiheuttama epätasainen maanpaine, joka saattaa kallistaa muuria tai aiheuttaa siihen halkeamia. [7] Lisäksi sodat ja tulipalot ovat osaltaan vaurioittaneet muureja. Muurit saattavat kärsiä myös muista rakenteellisista muutoksista, kuten esimerkiksi lisärakentamisesta tai muusta kuormitusten muutoksesta. [2]

2.3 Valumuurikohteet Suomessa

Muurattuja rakenteita on valmistettu Skandinaviassa 1000-luvun loppupuolelta lähtien ja Suomessa muuratut rakenteet tulivat käyttöön ennen vuotta 1200. Valumuuritekniikka, rakentamisessa tarvittu tieto kalkin poltosta ja kalkkilaastin valmistuksesta rantautui Suomeen Ruotsista ja Baltiasta tulleiden rakentajien mukana. Valumuuritekniikka säilyi lähes muuttumattomana keskiajalta aina 1900-luvun alkupuolelle asti, jonka jälkeen uudet rakennusmateriaalit ja rakenneratkaisut korvasivat vanhan työtavan [1]. Vallitsevaksi muurin rakennustekniikaksi valumuuri muodostui kirkko-, linna- ja linnoitusrakentamisessa. Tunnetuimpia kohteita ovat Turun linna, Olavinlinna ja Suomenlinna sekä useat vanhat kivikirkot. [7]

2.4 Valumuurien korjausten historia Suomessa

Valumuureja on ajan saatossa korjattu moneen otteeseen. Ensimmäiset korjaukset ovat liittyneet muurien toimivuuteen [1]. Restaurointimielessä muureja on ensimmäisen kerran korjattu ennen 1900-lukua. Olavinlinnassa muurien restaurointi on aloitettu 1870-luvulla ja seuraavat kohteet olivat Raasepori, Kuusisto ja Kastelholma [7]. Restaurointityössä käytettiin aluksi pääosin kalkkilaasteja, mutta 1920-luvulta lähtien laasteihin alettiin lisätä myös sementtiä enenevässä määrin. Korjaukset ulottuivat aluksi pelkästään muurin uloimpiin saumoihin, eikä syvemmälle muurin ytimeen. Vasta 1970-luvulla muureja alettiin korjata ns. syvätäyttömenetelmällä, jossa korjaukset ulotettiin syvemmälle muuriin. Laastit olivat kuitenkin tässä vaiheessa hyvin sementtipitoisia ja näinollen erittäin kovia. 1970–1990-luvuilla käytettiin yleisesti Parmu-laastia, jossa sideaineena oli sementti ja runkoaineen joukossa oli kalkkifilleriä. Parmun etuna oli hyvä pakkaskestävyys, mutta lopputuote oli erittäin kova ja niin tiivis, ettei muuriin imeytynyt vesi päässyt enää kuivumaan. Lisäksi Parmulla korjatun muurin myöhempi korjaus on vaikeaa laastin kovuuden vuoksi. [4]

1990-luvulla alettiin Parmusta luopua vähitellen ja käyttöön otettiin kalkki-sementtilaastit. Tavallisesti korjauksissa käytetty kalkki-sementtilaasti on ollut KS 50/50-laastia, eli laastissa on yhtä paljon kalkkia ja sementtiä. 2000-luvun alussa palaneen Tyrvään kirkon kunnostamisen yhteydessä kehitettiin ns. kirkkolaasti, joka oli KS 70/30-laastia. Tämän jälkeen restauroinnissa on siirrytty käyttämään yhä kalkkipitoisempia laasteja, ja esimerkiksi Suomenlinnassa on vuodesta 2005 asti sementti korvattu kokonaan hydraulisella kalkilla. Nykyään yhä useammassa historiallisesti merkittävässä kohteessa muurinkorjauslaastina käytetään hydraulisella kalkilla vahvistettua kalkkilaastia. [1]

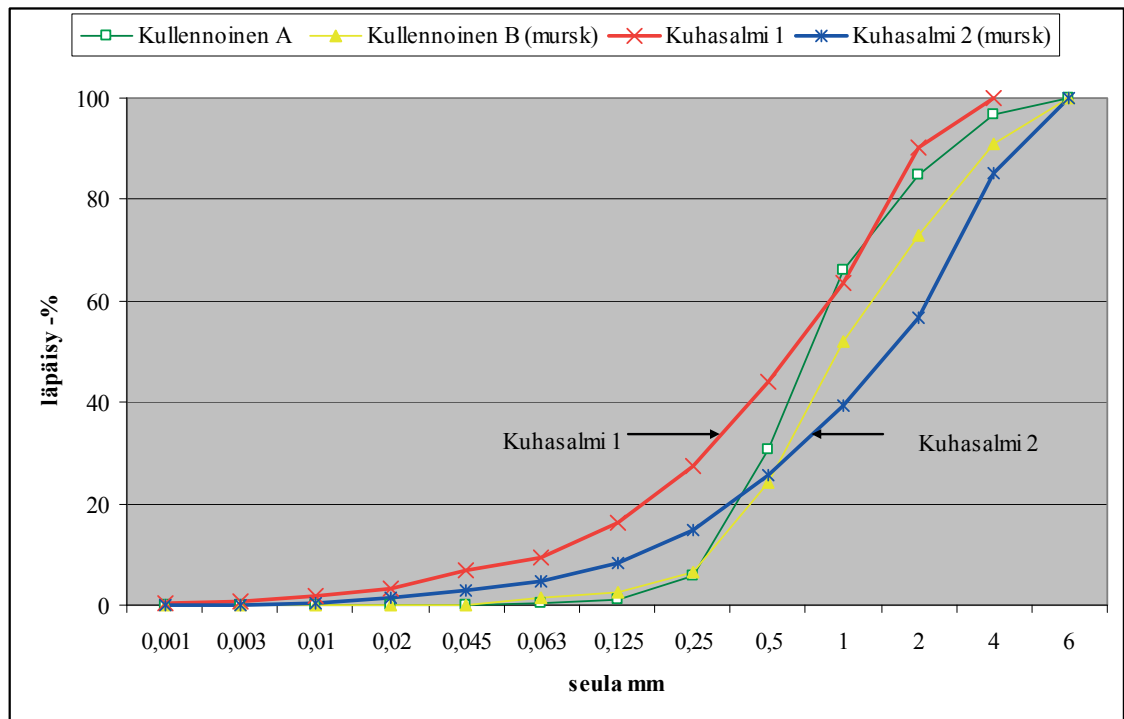
Suomenlinnassa käytetyn hydraulisella kalkilla vahvistetun kalkkilaastin, eli KKh-laastin, on kehittänyt filosofian tohtori ja kemisti Thorborg von Konow. Suomenlinnasta saatujen kokemusten perusteella von Konowin KKh-laastin sovellutuksia on sittemmin käy-

tetty muissa historiallisten kivirakenteiden korjauksissa yhä enemmän. Thorborg von Konow oli arvostettu laastiasiantuntija, joka tutki historiallisia laasteja ja kehitti vanhoihin rakenteisiin sopivia korjauslaasteja vuosikymmenten ajan. [20]

2.4.1 Käytössä olevat korjauslaastit

Museoviranomaisten suosituksiin perustuen tällä hetkellä historiallisten valumuurien korjauksissa pyritään siirtymään hydraulisella kalkilla vahvistettuihin kalkkilaasteihin eli KKh-laasteihin. Eri laastityyppejä ja niiden ominaisuuksia on esitelty kappaleessa 3.2. Korjaustekniikasta riippuen työmaalla voidaan tarvita kolmea erilaista laastia, pumppauslaastia, suojalaastia tai injektointilaastia. Näistä injektointilaastia käytetään hyvin vähän. Injektointia ei suositella muuta kuin paikallisiin korjauksiin ja erikoistapauksiin. [7]

Korjauksissa eniten käytetty laasti on pumppauslaasti, jota käytetään muurin syvätäyttöön ja kivien välisten saumojen korjaamiseen. Yleisesti käytössä olevan pumppauslaastin tyyppi on KKh 15/85/525. Sideaineiden ja runkoaineen suhteen lisäksi laastin toimintaan vaikuttaa käytetyn runkoaineen raejakauma. Olavinlinnan korjauslaastien kehittämisen yhteydessä paikallisista hiekoista on otettu näytteitä, kuvassa 2.2 on esitetty eri hiekanäytteiden rakeisuuskäyrät.



Kuva 2.2 Hiekanäytteiden rakeisuuskäyrät [10]

Von Konowin mukaan kuvassa 2.2 esitetyistä hiekoista Kuhasalmi 1:n rakeisuuskäyrä on erinomainen. Hienoainesta alle 0,06 mm on noin 10-% ja maksimiraekoko on 4 mm.

Tämä hiekka soveltuu käytettäväksi pumppauslaastiin ilman kvartsi- tai kalkkifillerin lisäystä. Von Konow laati tämän perusteella pumppauslaastireseptin, joka on seuraava (mitat tilavuusosina) [10]:

- Märkäkalkki (tahna) 5
- St. Astier NHL 5 22
- Kuhasalmi 1 65
- Karkea hiekka 4-6 mm 4

Suojalaastia käytetään pääasiassa muurin harjalla kiinnittämään vedeneristeen päälle tulevat kivet alustaan ja toisiinsa. Suojalaasti on tyypiltään hydraulista kalkkilaastia Kh 100/320. Injektointilaastilla voidaan injektoida hyvin kapeat saumat tai halkeamat. Injektointilaasti koostuu kalkista, hydraulisesta kalkista ja kvartsifilleristä ja sen maksimi rae-
koko on vain 0,2 mm. Injektointilaastin tyyppi on KKh 40/60/450. [11]

2.4.2 Käytössä olevat korjaustekniikat

Valumuurin korjaukset voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Ennen muiden töiden aloittamista tulee rakenteet suojata kastumista vastaan. Tämä voidaan tehdä lopullisen korjausratkaisun osana tai väliaikaissuojauksena. Kun rakenteet on suojattu kastumiselta, voidaan alkaa korjaamaan muurin pystysuoria osia. Käytetyin muurinkorjausmenetelmä on Suomessa 1970-luvulla kehitetty syvätäyttömenetelmä. [7]

Vedeneristeen korjaaminen

Mikäli muurin vedeneristeessä on vaurioita, niin käytännössä korjaukset aloitetaan väliaikaisen huputetun telineen rakentamisella. Hupun alla voidaan muurin vedeneriste korjata säältä suojassa. Monissa tapauksissa, kuten kivikirkoissa ja linnoissa, muurin alkuperäisenä vedeneristeenä toimii vesikatto. Vesikaton korjaaminen pyritään tekemään niin, että historiallisesti arvokas rakenne säilyy mahdollisimman vähäisin muutoksin. Korjauksissa käytetään alkuperäisen kaltaisia materiaaleja ja työtapoja. [7]

Kaikkia muureja ei ole alun perin katettu erillisellä vesikatolla. Muuri on saattanut myös raunioitua siihen tilaan, ettei alkuperäistä vedeneristettä enää ole tai sitä ei voida korjata. Näissä tapauksissa on useita vaihtoehtoja vedeneristeyksen korjaamiseksi. Muurin harjan yläpuolelle voidaan rakentaa erillinen katos, joka erottuu selkeästi muurin alkuperäisraken-
teesta. Katos voidaan tehdä esimerkiksi puusta tai teräksestä ja varsinaisena vedeneristeenä voi olla huopa tai pelti, rakenneratkaisut ja materiaalivalinnat tehdään kohdekohtaisesti. Tällaista ratkaisua on käytetty esimerkiksi Raaseporin linnan raunioiden kattamiseksi. [2]

Luonnollisempi vaihtoehto on rakentaa vedeneriste savesta ja tuohesta. Siinä muurin yläreuna rakennetaan kivillä jo mahdollisimman tiiviiksi ja huolehditaan, että tässä kerroksessa on reilu kallistus. Kivien päälle tulee paksut kerrokset savea ja tuohta. Vedeneristys

perustuu siihen, että kostea savi ei läpäise vettä. Siksi vedeneristyskerrosten päällä tulee olla vähintään 30 cm paksu nurmikerros, joka pitää savikerrokset jatkuvasti kosteina. Tällainen ratkaisu on käytössä esimerkiksi Suomenlinnassa. [2]

Kolmas vaihtoehto on rakentaa vedeneristys muurin sisään. Muurin yläreuna voidaan laatoa samantyyppiseksi kiviladelmaksi kuin itse muuri ja vedeneristys rakennetaan tämän alle piiloon nykyaikaisia materiaaleja hyödyntäen. Tässä ratkaisussa tulee muistaa huolehtia vedeneristeen alapuolisen tilan tuulettamisesta. Tällainen ratkaisu on toteutettu esimerkiksi Olavinlinnassa ja Kuusiston linnanraunioissa. [2]

Muurinkorjaus syvätäyttömenetelmällä

Itse muurinkorjaus tehdään usein syvätäyttömenetelmällä. Sen periaatteena on poistaa vaurioitunut muurin ydin, rapautunut vanha laasti, ja korvata vanha sisus kivillä ja uudella laastilla. Korjaus voidaan tehdä purkamatta muuria, jolloin sen ulkonäkö ja alkuperäinen luonne säilyy. Laajemmissa vaurioissa, kuten pullistumissa, joudutaan kuitenkin muurin pinta purkamaan ja latomaan uudelleen. Tavoitteena on asettaa naamakivet, eli muurin pinnassa näkyvät kivet, entisille paikoilleen. Mikäli muuria joudutaan purkamaan, on dokumentaatio ennen purkua tehtävä huolellisesti. [12]

Muurinkorjauksessa käytetyn laastin resepti on esitetty aiemmin tässä kappaleessa. Laastin valmistuksessa tulee noudattaa tarkkaa reseptiä, esimerkkinä Olavinlinnan korjauksiin liittyvä resepti on esitetty liitteessä A.

Muurin avaaminen aloitetaan poistamalla vaurioituneilta alueilta saumojen kiilakivet/-tiilet ja vanha laasti, näin avautuneista aukoista poistetaan myös syvemmältä muurista rapautunut laasti. Tavoitteena on poistaa kaikki muurissa oleva vaurioitunut, irtonainen aines kiinteään laastiin asti tai vähintään noin 10–15 cm avatun sauman viereisen kiven taakse. Tarvittaessa muurista voidaan nostaa kiviä ulos siksi aikaa, kun taustaa puhdistetaan. Muuria avatessa ja kiviä poistettaessa tulee muuria tukea puu- tai metallituilla, jottei muuri pääse romahtamaan. [7] Kuva 2.3 on Olavinlinnan korjaustyömaalta marraskuulta 2015. Kuvassa muurin saumoista on poistettu kiilakivet, vanha laasti ja kiviladelmä on tuettu puutuvin.



Kuva 2.3 Avattua ja tuettua muuria Olavinlinnassa 2015

Muurin avaamisen jälkeen avatut onkalot pestään pölyttömiksi ja kostutetaan juuri ennen täyttöä. Liiallista veden käyttöä tulee kuitenkin välttää, koska muuri on todennäköisesti jo valmiiksi märkä ja korjausten tavoitteena on saada muuri kuivumaan. Liiallinen paineellisen veden käyttö saattaa myös tuhota muurin rakennekerroksia, mikä vaikeuttaa muurin mahdollista rakennusarkeologista dokumentointia. Onkaloiden pesun ja kostutuksen jälkeen onkaloa aletaan täyttämään laastilla, johon painetaan mahdollisimman isoja täyte- ja kiilakiviä kunnes onkalo täyttyy. Kiilakiviä tulee jäädä näkyviin lopulliseen sauman pintaan siinä määrin, ettei kivien väliin muodostu kovin leveitä laastisaumoja, lisäksi kiilakivet tulee lyödä tiukasti kivi kiveä vasten, jotta muurin kantavana runkona säilyvät kivet, eikä laasti. Laastin tulisi tunkeutua kaikkiin muurin onkaloihin, tämä pyritään varmistamaan sullomalla ja pumpun aiheuttaman paineen avulla. [12]

Muurin saumojen viimeistelyyn käytetään kahta erilaista tekniikkaa. Laastia voidaan pumpata kivien välisiin onkaloihin niin paljon, että se alkaa pursua saumoista yli. Laastin annetaan kovettua noin tunnin, jonka jälkeen ylipursunut laasti pestään pois vedellä ja sauma viimeistellään. Tällä tekniikalla pesuvien keräyksen kanssa pitää olla huolellinen, jottei ympäristöä turmella. [4] Toinen tekniikka on pumpata tausta niin, että laasti jää saumojen ulkopinnasta hieman vajaaksi. Saumojen lopullinen täyttö tehdään varovasti laastikauhan ja saumaraudan avulla. Sauma muotoillaan ulospäin viettäväksi, niin että se ohjaa veden seinästä pois. Kun laasti on hieman kovettunut, harjataan laastipinta karkeaksi esimerkiksi nailonharjalla, jotta sauma hengittää ja muuri pääsee kuivumaan sen läpi. Yleensä muuri korjataan syvätäyttömenetelmällä, mutta yksittäisillä paikallisilla alueilla voidaan käyttää pelkkää uudelleen saumausta. Lopulliseen pintaan ei saa jäädä minkäänlaisia reikiä, josta sadevedet voisivat päästä muuriin. [12]

Laastin jälkihoito kestää 2-3 viikkoa. Jälkihoito voidaan tehdä vesisumutuksella tai kosteana pidettävän juuttikankaan avulla. [12] Huolellisella jälkihoidolla voidaan minimoida, tai estää kokonaan, laastiin syntyvien kutistumahalkeamien määrä.

2.4.3 Vanhojen suojeltujen rakennusten korjaus – yleistä

Vanhojen rakennusten korjaaminen ei ole ihan yhtä suoraviivaista kuin uudempien rakennusten. Monet vanhat rakennukset kuuluvat rakennussuojelun piiriin. Rakennussuojelulla pyritään yhteisen kulttuuriperinnön säilyttämiseen ja vaalimiseen. Suojelun perusteena voi olla esimerkiksi arkkitehtoninen, rakennushistoriallinen tai kulttuurihistoriallinen arvo. [15]

Suojellun rakennuksen korjauksiin ryhdyttäessä tulee Museovirasto tai maakuntamuseo ottaa hankkeeseen mukaan. Museoviranomaisten tehtävänä on valvoa ja ohjata rakennuksen suojelua ja sen toteutumista myös korjausten osalta. Hankesuunnitteluvaiheessa rakennukselle tulee määrittää suojelutavoitteet, joita tarkennetaan vielä varsinaisen suunnittelun alkaessa. Suojelutavoitteet voidaan ilmaista yleisinä tavoitteina tai hyvinkin yksityiskohtaisesti kohteesta riippuen. Suojelutavoitteissa määritetään ne ominaisuudet, joiden perusteella rakennus on merkitty säilytettäväksi. Museoviranomainen tarkistaa ja täsmentää suojelutavoitteita tarvittaessa. [15]

Ennen suunnitteluun ja korjauksiin ryhtymistä suojellusta rakennuksesta tulee tehdä rakennushistoriallinen selvitys ja kuntotutkimus, joissa selvitetään kohteen ominaispiirteitä ja historiaa sekä alkuperäisten rakenteiden ja myöhemmin tehtyjen korjausten kuntoa. Näiden selvitysten on tarkoitus ohjata suunnittelua ja antaa vastauksia ongelmakohtiin. Pitää muistaa, että perusteellisesti tehdyt esiselvitykset palvelevat myös myöhempiä korjauksia. [15]

Esiselvitysten jälkeen kohteen suunnittelu voi alkaa. Suunniteltujen korjausten tulee olla sopusoinnussa rakennuksen alkuperäisen arkkitehtuurin, rakennustavan ja rakennusmateriaalien kanssa. Restaurointiratkaisujen valinnassa kiinnitetään usein huomiota vain näkyviin pintoihin. Kuitenkin, jotta rakennuksen historiallinen arvo säilyy, pitää huomiota kiinnittää myös piiloon jääviin rakennusmateriaaleihin ja rakenneratkaisuihin. Museoviranomaiset valvovat, että suunnitelmat vaalivat vanhan rakennuksen arvoa, tämän vuoksi luonnossuunnitelmat tai rakennuslupakuvat käyvät museoviranomaisella lausuntokierroksella. Suunnittelua ohjaavat suojelutavoitteet, viranomaismääräykset, käyttötarkoitus ja taloudelliset mahdollisuudet. Näiden sovittaminen harmoniseksi kokonaisuudeksi saat-
taa muodostua haasteelliseksi, sillä jokaisella osapuolella voi olla oma näkemyksensä käytettävistä materiaaleista ja korjaustekniikoista. [15]

2.5 Aiemmin tehdyt valumuuritutkimukset ja havainnot

Käytössäni olivat Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy:n tekemät valumuurien laastisaumojen tutkimusten yhteenvetoreportit vuodelta 2015. Tutkimukset oli tehty Olavinlinnan, Suomenlinnan ja Turun linnan valumuurien laastisaumoista. Suomenlinnan ja Olavinlinnan tutkimuksissa tarkoituksena oli selvittää laastisaumojen kunto alueilta, joita on viime vuosina korjattu hydraulisella kalkilla vahvistetulla kalkkilaastilla. Näytteitä otettiin eri

vuosina korjatuilta alueilta ja kunkin alueen näytteenottoa pyrittiin valitsemaan niin, että se edustaisi ko. muurin laastisaumojen tilannetta mahdollisimman hyvin. [11] Turun linnan tutkimusten tarkoitus oli selvittää silmämääräisesti ehjiltä näyttävien laastisaumojen kunto ja pakkasrapautumistilanne [13].

2.5.1 Suomenlinna

Suomenlinnan rakennustyöt on aloitettu vuonna 1748. Ensimmäiset restaurointityöt on tehty 1920- ja 1930-luvun vaihteessa. 1960-luvulla korjauksilla pyrittiin tulokseen, joka kestää vuosisatoja. Alkupään restaurointityöt tehtiin sementtilaastilla ja raudoitettulla betonilla. [4] 1970-luvulla muureja alettiin korjaamaan syvätäyttömenetelmällä. Tähän tarkoitukseen käytettiin Parmu-laastia. Parmusta luovuttiin kuitenkin vähitellen ja tilalle tuli kalkkisementtilaastit. Vuonna 1998 sementti ruvettiin korvaamaan hydraulisella kalkilla. Tämä oli aluksi Jura-kalkkia, joka oli kuitenkin ominaisuuksiltaan lähempänä luonnonsementtiä kuin hydraulista luonnonkalkkia [4]. Vuodesta 2005 muurinkorjauslaastina on käytetty FT Thorborg von Konowin kehittämien reseptien avulla valmistettua hydraulisella kalkilla vahvistettua kalkkilaastia. Hydraulisena kalkkina on käytetty luonnonhydraulista kalkkia St. Astier NHL 5. [11]

Tutkimuksessa Suomenlinnan muureista otettiin yhteensä 6 laastinäytettä. Näytteet otettiin alueilta, jotka oli korjattu vuosina 2009–2013 hydraulisella kalkilla vahvistetulla kalkkilaastilla. Laastinäytteet olivat karbonatisoituneet vain vähän ulkopinnastaan. Pääosin laastit olivat kuitenkin lujittuneet hyvin, sillä hydraulinen kalkki kovettuu periaatteessa samoin kuin sementti. Korjauslaastin ja muurikiven/vanhan laastin tartunnoissa oli monin paikoin halkeamia sekä isohkoja tiivistyshuokosia ja -onkaloita. Laastisaumojen pinnalla esiintyi monin paikoin kalkkihärmettä, mikä viittaa suureen kosteusrasitukseen ja laastissa olevaan vapaaseen kalsiumhydoksidiin. [11]

Ohuthietutkimusten mukaan laastia ei voida pitää kauttaaltaan pakkasenkestävänä kosteusrasituksessa. Laastin ilmamäärä vaihteli 1-10 % välillä, eikä laastissa havaittu varsinaista lisähuokostusta. Huokosrakenteensa perusteella laasti on keskimääräistä huonommin pakkasenkestävää osa-alueilla, jossa ilmamäärä on vähäinen. Vuosina 2009-2010 korjatuilta alueilta laastin pintavyöhykkeessä esiintyi mikrohalkeamia, jotka ovat todennäköisesti pakkasrapautumisen aiheuttamia. Lisäksi vuonna 2013 korjatun alueen laastissa esiintyi samantyyppistä mikrohalkeilua, joka voi johtua pakkasrasituksesta. [11]

2.5.2 Olavinlinna

Olavinlinnan rakentaminen on aloitettu 1475, ja viimeiset muutosvaiheet ovat 1800-luvun alussa. Olavinlinnaa on entisöity 1800-luvun loppupuolelta lähtien. Viimeisin laajamittainen restaurointityö on saatu valmiiksi 1975, jonka jälkeen on tehty pienempiä korjauksia. 1977 alkaen Olavinlinnan muurinkorjauksissa on käytetty Parmu-laastia. Vasta

vuonna 2009 korjauksissa siirryttiin käyttämään vastaavaa hydraulisella kalkilla vahvistettua kalkkilaastia kuin Suomenlinnassa. [11]

Tutkimuksessa Olavinlinnan muureista otettiin 9 laastinäytettä. Näytteet otettiin alueilta, joita on korjattu vuosina 2010–2014 hydraulisella kalkilla vahvistetulla kalkkilaastilla. Laastinäytteiden havainnot olivat melko yhteneviä Suomenlinnan näytteiden kanssa. Laasti oli karbonatisoitunut vain vähän pinnastaan, korjauslaastin ja kivien/vanhan laastin tartunnoissa oli paikoin tiivistyshuokosia ja -onkaloita. Vähäinen karbonatisoituminen viittaa siihen, että laasti on hyvin tiivistä. [11]

Ohuthietutkimusten mukaan laastia ei voida pitää kauttaaltaan pakkasenkestävänä kosteusrasituksessa. Laastin ilmamäärä vaihteli 1-10 % välillä, eikä laastissa havaittu varsinaista lisähuokostusta, mutta ilmarikkaimmilla alueilla ilmasulkeumat olivat suojahuokoskokoluokassa ja voivat näin toimia pakkasrasituksessa suojahuokosten tavoin. Kahdessa näytteessä havaittiin joitakin halkeamia, jotka saattavat liittyä pintavyöhykkeen pakkasrasituksiin tai alkavaan pakkasrapautumaan. Nämä näytteet olivat vuoden 2010 ja 2014 korjauksista. Taustatietona oli, että vuoden 2010 korjausten jälkihoito oli ollut puutteellinen. [11]

2.5.3 Turun linna

Turun linnan rakentaminen on alkanut 1200-luvun loppupuolella. Linnaa on rakennettu useissa eri vaiheissa ja lopullisen muotonsa se on saanut 1500-luvun lopulla. Turun linna kärsi mittavista vaurioista sotavuosina. Sotien jälkeen vuonna 1946 päälinnaa alettiin restauroimaan. Restaurointityö valmistui 1961 ja sen tavoitteena oli palauttaa päälinna mahdollisimman lähelle 1500-luvun asua. Päälinnaa on sen jälkeen korjattu Museoviraston johdolla 1987–1993 ja esilinnaa vuosina 1975–1987. [14]

Tutkimuksessa Turun linnan päälinnan eteläsivun muurista otettiin viisi laastinäytettä. Laastinäytteiden ikää ei kerrottu tutkimuksessa. Laastinäytteiden koostumus vaihteli, yksi näyte oli selkeästi kalkkisementtilaastia ja loput näytteistä olivat puhdasta kalkkilaastia tai kalkkirikasta kalkkilaastia, jossa oli satunaisia sementtirakeita tai vähäinen määrä sementtiä. Laastinäytteiden karbonatisoituminen vaihteli, osa näytteistä oli karbonatisoitunut kokonaan ja osa vain vähän. [13]

Ohuthietutkimusten mukaan Turun linnan kalkkilaasteja ei voida kauttaaltaan pitää pakkasenkestävänä kosteusrasituksesta, paikoitellen laasteilla kuitenkin voi olla jonkinasteista pakkasenkestävyyttä. Laastinäytteiden ilmamäärä vaihteli 3-10 % välillä. Kalkkisementtilaastinäytteessä ja yhdessä kalkkilaastinäytteessä havaittiin joitakin pakkasrapautumaan viittaavia halkeamia, muissa näytteissä ei pakkasrapautumaan viittaavia vaurioita havaittu. [13]

2.5.4 Yhteenveto tutkimuksista

Turun linnan tutkimuksen tavoitteena oli silmämääräisesti ehjien laastisaumojen kunnon selvittäminen tulevia korjauksia varten. Turun linnan tutkimuksen perusteella vaikuttaisi siltä, että ainakin jossain määrin vanhoja ehjiä kalkkilaastilla tehtyjä saumoja voitaisiin teknisessä mielessä säilyttää. Tutkimus on kuitenkin ollut niin suppea, ettei yleispäteviä johtopäätöksiä saumalaastien kunnosta voida tehdä, koska saumoissa on erityyppisiä ja -ikäisiä laasteja. [13]

Olavinlinnan ja Suomenlinnan tutkimuksissa saatiin arvokasta tietoa nykyisin paljolti käytössä olevasta hydraulisella kalkilla vahvistetusta kalkkilaastista. Laastin ilmahuokokset jakautuvat epätasaisesti, mikä aiheuttaa paikallista vaihtelua laastin pakkasenkestävyyteen. Laastin pakkasenkestävyyttä tulisi parantaa. Pakkasenkestävyyden kannalta on tärkeää, että laastissa on riittävästi ja tasaisesti jakautuneena suojahuokoskokoluokan ilmahuokosia. Yksi mahdollisuus ilmahuukosten muodostamiselle olisi huukostimen käyttö. Huukostin vaikuttaa samalla myös laastin työstettävyyteen. Tämän diplomityön kokeellisessa osuudessa on tarkoitus selvittää huukostimen vaikutus KKh-laastin ominaisuuksiin. Nykyisin käytetyn KKh-laastin koostumus ja työmenetelmä jättävät muurikivien ja täytettävien onkaloiden pinnoille jonkin verran tiivistämättömiä ilmataskuja. Tiivistämistapaa tulisi kehittää niin, että laastiin sekä sen kontaktipinnoille jäisi mahdollisimman vähän avoimia tiivistyshuukosia ja onkaloita. [11]

3. LAASTIT - YLEISTÄ

Laastityyppejä on lukuisia erilaisiin käyttötarkoituksiin. Yhteistä kaikille laasteille on kuitenkin niiden ainesosat. Kaikki laastit koostuvat suunnilleen samalla tavalla sideaineesta, runkoaineesta, vedestä ja mahdollisista lisäaineista. [3] Nykyään tavallisesti laastit tulevat työmaalle valmiiksi sekoitettuina kuivalaasteina, joihin lisätään vain vesi. Valumuurikorjauksessa kuitenkin käytetään vielä vanhaa laastin valmistustekniikkaa, jossa kaikki laastin ainesosat sekoitetaan keskenään vasta työmaalla [4]. Koska nykyisten laastien määrä on niin suuri, niin tässä diplomityössä keskitytään vain luonnonkivimuureissa käytettyihin laasteihin ja niiden ominaisuuksiin.

3.1 Laastin ainesosat

Laastin kantavana runkona toimii runkoaine. Runkoaine koostuu erikokoisista ja -muotoisista rakeista, jotka ovat tyypillisesti hiekkaa tai murskattua kiveä. Runkoainetta, yhtä tai useampaa sideainetta ja nestettä, tyypillisesti vettä, sekoitetaan sopivassa suhteessa keskenään. Näin syntyy aluksi juokseva ja muotoiltava tuore laasti, joka alkaa jonkin ajan kuluttua jäykistyä ja kovettua. [3] Seuraavassa tarkastellaan laastin eri ainesosien merkitystä ja tehtäviä tuoreessa laastissa, lujuuden kehityksen eri vaiheissa ja valmiissa rakenteessa.

3.1.1 Sideaine

Tuoreessa laastissa sideaine vaikuttaa paljon laastin notkeuteen. Sideaineen ja veden seos toimii kuten voiteluöljy. Se asettuu liukukerroksena runkoaineiden ympärille samalla vähentäen näiden välistä kitkaa. Voitelun teho riippuu hyvin paljon sideainetyypistä, mutta yleissääntönä voidaan pitää, että mitä enemmän laastissa on sideainetta, sitä notkeampaa se on. Laastimassan oikeanlainen notkeus on tärkeää, jotta laastia voidaan käsitellä työmaalla helposti. [3]

Kovettuneessa laastissa sideaineen tehtävä on toinen kuin tuoreessa laastissa. Sideaineen tärkein tehtävä on toimia liima-aineena sitomaan runkoainerakeet toisiinsa sekä luomaan laastille vaadittu lujuus ja tartunta kappaleeseen. Tämä liima-aine on yleensä lujuudeltaan ja kemialliselta kestävyydeltään heikompaa kuin runkoaine. Lisäksi se on alttiimpi tilavuuden muutoksille. Tämän vuoksi sideainetta ei saa olla liikaa, jotta kovettuneen laastin ominaisuudet ovat mahdollisimman hyvät. [3]

Vanhoissa laasteissa sideaineena on tyypillisesti käytetty kalkkia [4]. Sittemmin sideaineeksi 1800-luvun lopulla yleistyi sementti. Sementtiä käytettiin sideaineena 1900-luvun muurinkorjauslaasteissa yleisesti. 1990-luvulta lähtien on kokeiltu kalkin ja sementin

seoslaastia. Valumuurien korjauksista saatujen kokemusten perusteella nykyisin on kuitenkin siirrytty takaisin yhä kalkkipitoisempiin korjauslaasteihin. Yhä useammin sementti korvataan kokonaan hydraulisella kalkilla. [1]

Kalkki

Kalkki valmistetaan kalkkikivestä, joka on pääasiassa kalsiumkarbonaattia, CaCO_3 . Kalkkikiveä kuumentamalla siitä poistuu hiilidioksidi, CO_2 , ja jäljelle jää kalsiumoksidi, CaO , jota kutsutaan poltetuksi tai sammuttamattomaksi kalkiksi. Kalkin poltossa lämpötilan tulee olla vähintään $900\text{ }^\circ\text{C}$ ja palamisaika kaksi-kolme päivää [4]. Polton yhteydessä kalkkikivi säilyttää ulkomuotonsa, mutta se muuttuu huokoisemmaksi hiilidioksidin erkaantuessa [4]. Kalkkikiven polttamisen jälkeen siihen lisätään vettä, jolloin kalsiumoksidi muuttuu lämpöä kehittäen kalsiumhydroksidiksi, Ca(OH)_2 . Veden lisäämistä kutsutaan kalkin sammuttamiseksi. [3] Kuvassa 3.1 on esitetty poltetu kalkkikivi ennen kalkin sammuttamista [9].



Kuva 3.1 Kalsiumoksidi eli poltetu kalkkikivi [9]

Vanhoja kalkin sammutusmenetelmiä on tulkittu monin tavoin. Kirjallisuuslähteissä viitataan usein pitkiin sammutusaikoihin, pisimmillään jopa 30 vuoteen. Tyypillisesti aika on kuitenkin ollut joitakin vuosia. Kalkkia on sammuteltu haudassa runsaalla vedellä tai peitettynä hiekalla ja vähäisellä vesimäärällä. Pidempiaikainen sammutus on hoidettu peittämällä kalkki hiekalla ja annettu sen sammua itsekseen vuosikausia sadeveden ja ilman kosteuden vaikutuksesta. Nopeampi ja erikoisempi sammutus on hoidettu upottamalla kalkkikivilohkareita useamman kerran vedessä, jonka jälkeen ne on suljettu tynnyriin. Yhtenäisyyksiä historiallisille ja nykyaikaisille sammutusmenetelmille löytyy periaatepuolelta. Runsaan veden käyttö sammutuksessa, jolloin kalkista tulee liimamaista massaa (märkasammutus) ja hillitymmän veden käyttö, jolloin kalkista tulee jauhetta (kuivasammutus). [5]

Nykyisin kalkin sammuttamismenetelmiä on kaksi. Märkasammutettua kalkkia valmistetaan lisäämällä poltetuun kalkkiin vettä huomattavasti enemmän kuin mitä sammutusre-

aktio teoreettisesti vaatii. Näin sammutuksessa syntyy kalkkilietettä, jota seisotetaan sammutuksen jälkeen matalassa astiassa tai ns. kalkkihaudassa tarvittava aika. Varastoinnin aikana lietteessä tapahtuu jälkisammumista ja veden erottautumista, jonka vuoksi liete muuttuu vähitellen jäykähköksi massaksi. Toinen kalkin sammutusmenetelmä on kuivasammutus. Kuivasammutettua kalkkia valmistetaan lisäämällä poltettuun kalkkiin vain hieman runsaammin vettä kuin mitä sammutusreaktio teoreettisesti vaatii. Näin sammutuksessa syntyy kuivaa ja hienorakeista jauhetta, jota yleisesti kutsutaan rakennuskalkiksi [4]. [3]

Kovettumistapansa perusteella kalkit voidaan jakaa ilmakalkkeihin ja hydraulisiin kalkkeihin. Kovettumistapaan vaikutetaan valmistuksessa käytettävien kivilajien valinnalla. Ilmakalkkeja valmistetaan polttamalla puhdasta kalsiitti-, dolomiittista kalsiitti- tai dolomiittikiveä. Hydraulisia kalkkeja valmistetaan polttamalla kvartsi-, savi- ja/tai rautaoksidipitoista kalkkikiveä alle sintrautumislämpötilan. Hydraulisia ominaisuuksia aiheuttavat edellä mainitut luonnolliset epäpuhtaudet tai lisätyt aineet, kuten kalkkikivimerkeli tai latenttiset hydrauliset aineet (masuunikuona, trassi jne.). [5]

Hydraulisia kalkkeja on erilaisia. Hydraulinen kalkki (HL hydraulic lime) on voitu valmistaa sekoittamalla ilmakalkkia ja sopivia hydraulisia aineita, kuten hydraulista kalkkia tai sementtiä. Tällainen hydraulinen kalkki ei ole luonnonkalkkia. Hydraulisessa luonnonkalkissa (NHL natural hydraulic lime) ei ole muita ainesosia kuin poltettua luonnossa esiintyvää hydraulista kalkkikiveä. Hydrauliset luonnonkalkit jaotellaan vielä lujuutensa perusteella eri luokkiin. Eri luokat ilmaistaan kalkkityypin perään liitettävällä numerolla. Tyypillisimmät luokat ovat NHL 2, NHL 3,5 ja NHL 5. Esimerkiksi NHL 5 tarkoittaa hydraulista luonnonkalkkia, jonka puristuslujuus on 28 vuorokauden ikäisenä 5-15 MPa. [4]

Ilmakalkit kovettuvat karbonatisoituuksaan. Karbonatisoituminen on hyvin hidas prosessi. Siinä ilman hiilidioksidi, CO_2 , reagoi laastin sideainekalkin eli kalsiumhydroksidin, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kanssa. Reaktio vaatii ilman lisäksi myös kosteutta, johon kaasun liukenee, joten ilman suhteellinen kosteus tulee olla yli 60 prosenttia. Vaikka ilmakalkit vaativat kosteutta kovettuakseen, niin vedessä ne eivät kuitenkaan kovetu hiilidioksidin puutteen vuoksi. Koska karbonatisoitumisreaktio on hidas ja se vaatii ilmaa sekä kosteutta, valumuurin sisällä kalkki ei karbonatisoidu koskaan. [4]

Hydraulinen kalkki muodostaa lujuutta myös veden vaikutuksesta. Hydraulinen kalkki on aina kuivasammutettua, koska märkäsammutus poistaisi sen hydrauliset ominaisuudet. [3] Hydraulisen kalkin kovettumista voidaan verrata vähän sementtiä sisältävään kalkkimenttilaastiin [6]. Hydraulisen kalkin kovettuessa kalkin sisältämä dikalsiumsilikaatti reagoi veden kanssa tuottaen kalsiumsilikaattihydraattia ja kalsiumhydroksidia. Kemiallinen reaktio on samankaltainen kuin sementillä kovettuessaan. [4]

Sementti

Sementti on voimakkaasti hydraulinen sideaine, joka pystyy kovettumaan vedessäkin [3]. Sementtilaatuja on nykyisin lukuisia, joten kaikkia ei käydä läpi tässä työssä. Keskitytään vain vanhoihin sementteihin ja nykyisin yleisimpään sementtiin, portlandsementtiin.

Nykyaikainen portlandsementti valmistetaan polttamalla kalkkikiven ja saven seosta kiertouunissa noin 1500 °C lämpötilassa. Polton aikana syntyy sementtiklinkkeriä, joka on kemialliselta koostumukseltaan pääasiassa erilaisia kalsiumsilikaatteja ja kalsiumalumiinaatteja sekä rautayhdisteitä. Polton jälkeen klinkkeri jauhetaan kuulamyllyssä hienoksi jauheeksi ja samalla siihen lisätään pieniä määriä kipsiä säätelemään sementin sitoutumisaikaa. Kemiallisen koostumuksen ja jauhamisasteen avulla voidaan vaikuttaa portlandsementin ominaisuuksiin, kuten kovettumisnopeuteen. [3]

Nykyaikainen portlandsementti patentoitiin 1800-luvun alkupuolella. Kuitenkin jo tätä ennen on tehty sementin kaltaisia sideaineita, mutta raaka-aineet ja niiden suhteet poikkesivat portlandsementin vastaavista. Vanhempia sementtejä kutsutaan myös luonnonsementeiksi. Niiden poltto tapahtui paljon alhaisemmassa lämpötilassa kuin nykysementillä. Polttolämpötilaa pidettiin matalampana, jotta välttyttäisiin kovien klinkkerirakeiden syntymiseltä. Klinkkereiden eli poltetun sementin jauhatus oli nimittäin työlästä ja kallista. Tuohon aikaan ei vain ymmärretty klinkkerinmuodostuksen ja jauhamisen vaikutuksia lujituksenkehitykselle. Puutteellisen jauhatuksen takia vanhojen sementtien klinkkerikoot ovat paljon suuremmat kuin nykyisissä sementeissä. Mikroskooppitutkimuksissa vanhoista sementtilaasteista on löytynyt läpimitaltaan 0,5-0,9 mm klinkkerirakeita. Nykyaikaisen portlandsementin keskimääräinen klinkkerirakekoko on 0,02 mm. [4]

Sementtiklinkkerimineraalit reagoivat veden kanssa, jolloin syntyy hydraatituotteita eli sementtigeeliä. Kovettumisprosessissa hydraatituotteista muodostuu jäykkä massa, joka korvaa vähitellen veden sementtihiukkasten välillä ja lopulta sitoo massan lujaksi rakenteeksi. Sementin kovettumisnopeus riippuu kemiallisen koostumuksen lisäksi sementtiklinkkereiden koosta ja vesi-sementtisuhteesta. Sementin hienouden kasvaessa ja vesi-sementtisuhteen pienentyessä sementin kovettumisnopeus kasvaa. [5] Vanhojen sementtien suuret klinkkerirakeet siis hidastavat reaktiokykyä, eivätkä kaikki suuret rakeet reagoi osittain lainkaan veden kanssa. Esimerkiksi vanhoissa laastitutkimuksissa havaituissa suurissa sementtiklinkkereissä hydratoituminen on tapahtunut vain rakeiden pinnassa vaikka niillä on ikää jo 150 vuotta. [4]

Muuraussementti

Muuraussementti valmistetaan portlandsementistä ja luonnonkivistä. Luonnonkivet voivat olla esimerkiksi kalkkikiveä, dolomiittia tai kvartsia. Luonnonkivi ja portlandsementti jauhetaan yhdessä hienoksi ja lopputuloksena on portlandsementtiä hienorakeisempi jauhe. Muuraussementtiin lisätään aina erilaisia lisäaineita työstettävyyden parantamiseksi, muuten sen valmistustapa ja kovettumisreaktiot ovat käytännössä samanlaiset

kuin tavallisellakin sementillä. [3] Kivirakenteisten muurien korjauslaasteissa käytetty sementti on ollut enimmäkseen muuraussementtiä [7].

3.1.2 Runkoaine

Laastin pääainesosa on runkoaine. Runkoaineena käytetään yleisimmin luonnonhiekkaa, mutta joskus myös murskattua kiveä tai erikoislaasteissa tehdasvalmisteita. Runkoaine muodostaa laastin rungon, ja sideaine liimaa runkoainerakeet yhteen. [5]

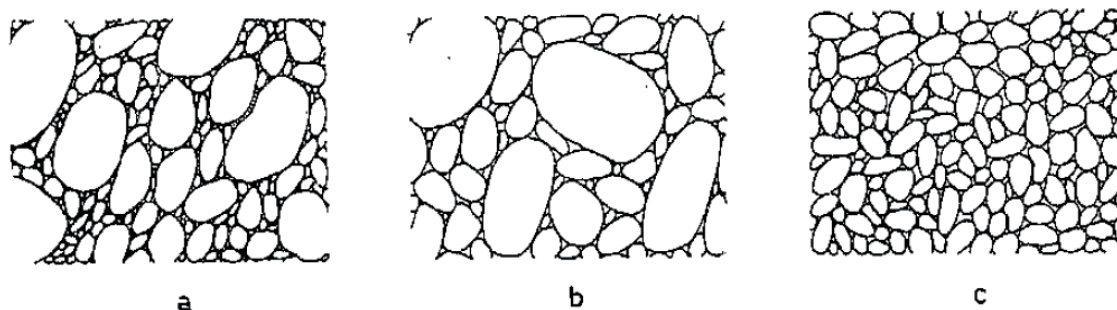
Runkoaineessa tulee olla sopivassa suhteessa eri raekokoja, jotta rakeet pakkautuvat mahdollisimman tiiviisti ja sideaineella täytettäviä onkaloita jää mahdollisimman vähän [6]. Eri raekoot erotellaan toisistaan seulomalla esimerkiksi 4-0,07 mm kokoisilla seuloilla. Punnitsemalla erikokoisiin seuloihin jäävät rakeet, voidaan laskea runkoaineen rakeisuus ja piirtää sen rakeisuuskäyrä eli raejakauma. [4]

Runkoaine vaikuttaa hyvin paljon laastin kestävyys- ja lujuuteen. Ihannetilanteessa runkoainerakeet ovat pyöreitä ja tyhjää tilaa on mahdollisimman vähän. Suurimmat rakeet ovat tiiviisti toisissaan kiinni ja niiden väliin jäävät tyhjätilat ovat täyttyneet pienemmillä rakeilla. Käytännössä näin ei kuitenkaan ole. Karkeimpien rakeiden väliin jää aina pienempiä rakeita, jolloin tyhjätilojen määrä kasvaa. Näitä tyhjätiloja pyritään täyttämään läpimitaltaan alle 0,075 mm kokoisilla rakeilla, joita kutsutaan hienoainekseksi eli filleriksi. [3]

Hienoaines vähentää sideaineen tarvetta tiettyyn rajaan asti. Jos hienoainesta on liian vähän, tarvitaan sideainetta enemmän saman lujuuden saavuttamiseksi, samalla kutistumisvaara kasvaa ja laastin työstettävyyden huononee. Jos hienoainesta on liikaa, se saattaa peittää karkeammat rakeet kalvolla, joka estää kostumisen ja sitoutumisen. Hienoaines saattaa erottaa karkeammat rakeet toisistaan, jolloin laastissa oleva tyhjätila, sideaine- ja vedentarve lisääntyy. [5] Hienoaineksen oikea määrä suhteessa karkeampiin fraktioihin on siis tärkeää. Sopiva määrä oikeanlaista hienoainesta parantaa laastin ominaisuuksia, erityisesti työstettävyyttä. Hienoaineksen vaikutuksesta laastin työstettävyyteen löytyy monia tutkimuksia. Seuraavassa on esitetty pääkohtia muutamista tutkimuksista. Ylikosken mukaan hienoaineksen materiaalilla on vaikutusta työstettävyyteen [16]. Serpentiini-, silika- ja savifilleri jäykistävät laastia, kun taas kalkkifilleri ja yksi tutkimuksissa käytetty luonnonfilleri notkistavat laastia. Lentotuhka ja toinen tutkimuksissa käytetty luonnonfilleri eivät juurikaan vaikuttaneet työstettävyyteen. Hienoainestyyppin valinta vaikuttaa myös hieman laastin lujuuteen. Tulokset eivät kuitenkaan ole täysin yleispäteviä, koska tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella tiettyjen, saatavilla olevien fillerimateriaalien soveltuvuutta laastin valmistukseen. Harini et al. toteavat tutkimuksissaan, että runkoaineeseen jäävät tyhjätilat vaikuttavat laastin notkeuteen [17]. Mitä enemmän tyhjätiloja on, sen jäykempi laasti on. Oikeanlainen määrä hienoainesta täyttää runkoaineen tyhjätiloja, jolloin laastista tulee notkeampi. Samankaltaiseen lopputulokseen ovat päätyneet

myös Hu ja Wang tutkimuksessaan [18]. Myös heidän mukaan runkoaine, jossa tyhjätiloja täytetään hienoaineksella tuottaa notkeamman laastin.

Vanhoissa laasteissa runkoainemäärä on yleensä paljon pienempi kuin uusissa laasteissa, eli vanhat laastit ovat ns. lihavia. Runkoainerakeiden välisten tyhjätilojen täyttämiseksi laasteihin lisättiin usein runsaasti kalkkia, tästä syystä hyvät vanhat laastit ovat tiiviitä ja kestäviä. Jos laastissa on runsaasti sideainetta, jää runkoainejakauman vaikutus laastin toiminnalle vähäiseksi. Hyvän runkoainejakauman määrittäminen onkin aiemmin ollut epä-määräistä. Eräs ohje on ollut seuraava: ”Laastihiekkaa pitää tunnustella kädellä. Hiekka ei ole riittävän teräväsärmäistä, ellei voida tuntea erikseen jokaista rae-tta. Jos käteen jää paljon pölyä, on hiekan hienoaines liian suuri. Rappauslaastin hiekan tulee olla hienora-keisempaa kuin muurauslaastissa”. [4] Kuvassa 3.2 on esitetty läpileikkaus erilaisen rae-koostumuksen omaavista hiekkalaaduista.



Kuva 3.2 Leikkaus eri raekoostumuksista, (a) hyvä raekoostumus, (b) hiekka, josta puutuu hienoaines, (c) huono, tasalaatuinen hiekka [3]

3.1.3 Vesi

Vesi vaikuttaa tuoreen laastin työstettävyyssominaisuuksiin ja se osallistuu kemiallisiin ja fysikaalisiin kovettumisprosesseihin. Laastiin käytettävän veden on oltava puhdasta. Vedessä olevat epäpuhtaudet kuten suolat tai orgaaniset aineet saattavat hidastaa laastin kuivumista, estää lopullista kovettumista ja aiheuttaa likavalumia rakenteessa. [3]

Nykyään veden laatu harvemmin aiheuttaa hankaluuksia laastissa, sillä tavallinen vesi-johtovesi sopii käytettäväksi laasteihin hyvin. Aiemmin yksi suositus on ollut käyttää sade- tai jokivettä siten, että veteen sekoitetaan poltettua kalkkia. Kirkastuttuaan vettä voitiin käyttää laastin valmistuksen lisäksi kalkin sammuttamiseen. [5]

3.1.4 Lisäaineet

Sideaineen, runkoaineen ja veden lisäksi laastiin voidaan lisätä erilaisia lisäaineita. Lisä-aineilla voidaan vaikuttaa tuoreen laastimassan sekä kovettuneen laastin ominaisuuksiin kuten työstettävyyteen, tartuntaan, kovettumisnopeuteen, väriin tai pakkasenkestävyy-teen. [5]

Lisäaineiden käyttöä laasteissa ei ole systemaattisesti tutkittu, toisin kuin betonissa. Usein betonilla saatuja tuloksia on huonolla menestyksellä sovellettu laastiteknologiaan. [5] Tässä työssä on tarkoitus paneutua laastireseptin lisäksi lisäaineiden vaikutuksiin muurinkorjauslaasteissa.

Nykyaikaiset lisäaineet

Huokostimet

Lisähuokostusaineiden avulla voidaan parantaa tuoreen laastimassan notkeutta ja samalla kovettuneen laastin pakkasenkestävyyttä. Huokostimet lisäävät laastin ilmamäärää. Ilmamäärän kasvaessa kovettuneen laastin lujuus heikkenee. Koska huokostimet notkistavat laastimassaa, voidaan vesi-sideaine suhdetta pienentää. Vesi-sideainesuhteen pienennyksellä voidaan kompensoida lujuuden menetystä, sillä se lisää laastin lujuutta jossain määrin. [3] Laastille suurin suositeltava ilmapitoisuus on 15–20 % [5]. Huokostimina käytetään yleensä rasvahappojen natriumsuoloja. Huokostimen määrä laastissa on yleensä hyvin pieni, noin 0,01-0,06 p-% sideaineen painosta. [8]

Hidastimet

Hidastimilla voidaan pidentää kalkkisementti- (KS) ja sementtilaastien (S) työstettävyyttä. Hidastimia käytetään, kun laastia joudutaan kuljettamaan pitkiä matkoja tai kun työskennellään korkeissa lämpötiloissa. Hidastimet vaikuttavat sementin kemiallisiin reaktioihin, joten niiden vaikutus riippuu sementin koostumuksesta. [3]

Kiihdyttimet

Kiihdyttimillä nopeutetaan laastin sitoutumista ja kovettumista. Kiihdyttimiä käytetään etupäässä kalkkisementti- (KS) ja sementtilaasteilla (S). Talvibetonoinnissa kiihdyttimenä on käytetty kalsiumkloridia, laasteissa sen käytössä pitää olla varovainen, koska se usein aiheuttaa suolojen erittymistä ja metallien korroosiota. [3]

Notkistimet

Notkistimet parantavat laastin työstettävyyttä muilla keinoilla kuin ilmaa lisäämällä. Tällaisia aineita on kahta tyyppiä: pinta-aktiivisia aineita ja geelejä muodostavia aineita. Pinta-aktiiviset aineet, saippuat [5], perustuvat niiden kostuttaviin ja dispergoiviin ominaisuuksiin, jotka parantavat laastin plastisuutta. Geelejä muodostavat aineet, sellulosaayhdisteet [5], vähentävät laastin vedenerottumista. Laasteissa näistä käytetään pääasiassa viimeksi mainittua. Aineen määrä on tavallisesti 0,2-0,5 % sideaineen painosta. [3]

Pakkassuoja-aineet

Pakkassuoja-aineilla pyritään alentamaan veden jäätymispistettä, ettei talvitöissä tapahtuisi vaurioita tuoreessa laastissa. Pakkassuoja-aineina käytetään mm. kalsium- ja magnesiumkloridia, jotka samalla toimivat kiihdyttiminä. Näillä lisäaineilla jäätymispistettä saadaan alennettua vain 2-3 °C, ja kun otetaan huomioon aineiden haittavaikutukset kuten lujuuden aleneminen ja teräskorroosiolle haitallisten suolojen lisääntyminen, niin hyöty jää pieneksi haittavaikutuksiin nähden. Kalkkipitoisessa laastissa jäätymispistettä voidaan alentaa denaturoidun spriin kanssa. Spriin avulla jäätymispistettä voidaan alentaa enemmän kuin kalsium- ja magnesiumkloridien avulla, mutta haittavaikutukset ovat pienemmät. [3]

Tiivistysaineet

Tiivistysaineiden avulla laastista saadaan tiivistä paitsi vettä vastaan niin myös vesihöyryn diffuusiota vastaan. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi eräät hydroksidit, saippuat ja erilaiset fillerit. Tiivistävä vaikutus perustuu siihen, että aineet täyttävät laastin huokokset. [3]

Vettä hylkivät lisäaineet

Vettä hylkivät aineet estävät veden imeytymistä huokosiin. Kapillaarinen vesi ei pääse tunkeutumaan laastiin, mutta koska huokokset jäävät avoimeksi, pääsee vesihöyryn diffuusio vielä tapahtumaan. Käytetyt aineet ovat metallistearaatteja, silikoniyhdisteitä tai modifioituja silaaneja. [5]

Muut lisäaineet

Muita lisäaineita ovat vielä eriväriset pigmentit ja kuidut. Pigmenttien lisäyksellä voidaan valmistaa erivärisiä laasteja. Laastin väriin tosin voidaan vaikuttaa myös runkoainevalinnalla. Pigmentit lisäävät laastin vedentarvetta ja laastin kutistumaa. [6]

Kuitujen avulla pyritään rajoittamaan tuoreen laastin plastisen vaiheen kutistumia sekä parantamaan kovettuneen laastin vetolujuutta. [6]

Historialliset lisäaineet

Kirjallisuudesta löytyy pitkä lista erilaisista lisäaineista, joita on mahdollisesti käytetty vanhoissa laasteissa. Kuitenkin selitykset lisäaineiden vaikutuksista laastin ominaisuuksiin ovat enimmäkseen arvailuihin perustuvia tai lisäaineiden vaikutustapa on kokonaan jätetty kommentoimatta. Suomessa ei historiallisten lisäaineiden käyttöä ole toistaiseksi tarkemmin tutkittu. [5]

Kiinteät lisäaineet

Laasteihin on aikoinaan lisätty monenlaisia kiinteitä aineita. Tässä kappaleessa mainitaan vain mahdollisesti Suomessa käytettyjä lisäaineita, kaikkea kirjallisuudesta löytyvää ei ole ollut Suomessa saatavilla. [5]

Laastiin on saatettu lisätä olkia, pilkottua narunpätkää tai hiuksia ilmeisesti kasvattamaan laastin lujuutta kuitujen tavoin. [5]

Laihoja kalkkilaasteja, eli laasteja joissa on vähäinen määrä sideainetta verrattuna runko-aineeseen, on keskiajalla jatkettu tuoreella savella. Savi toimi lähinnä plastisointiaineena. Suomessa Raaseporin keskiaikaisen laastin alhainen märkälujuus viittaa tuoreen saven käyttöön. [5]

Laastin lujuuteen ja kestävyYTEEN on pyritty vaikuttamaan monilla lisäaineilla. Käytetyistä lisäaineista alunan, rikin, rikkihapon ja kuparisulfaatin väitetään heikentävän laastia. Toinen lähde kuitenkin väittää, että jauhettu ja poltetTU aluna parantaa kalkkilaastin kovettumista. Eli yksiselitteisiä kaikkien aineiden vaikutukset eivät ole. Laastin lujuutta ja kestävyYTEä on koitettu parantaa lisäämällä laastiin pieniä määriä tavallista suolaa tai stearaatteja kuten talia. [5]

Ravintoainepohjaiset ja muut lisäaineet

Keskiajalla on ollut käytössä useita orgaanisia lisäaineita, joiden käyttötarkoitus ja –tapa eivät kuitenkaan ole tarkoin selvillä. Orgaaniset lisäaineet voidaan jakaa kahteen pääryhmään, jotka ovat: proteiinipitoiset lisäaineet (kananmuna, maito, veri, ihra yms.) ja polysakkaridit (olut, hunaja, siirapit, tärkkelyspohjaiset hyytelöt yms.). [5]

Proteiinien avulla on pyritty säätelemään laastin jäykistymistä. Proteiinit muodostavat ohuen, hiilidioksidin tunkeutumista estävän kalvon, joka hidastaa karbonatisoitumista. Lisäksi proteiinit ovat parantaneet laastin tartuntaa, myös sideaineen tartuntaa runko-aineeseen. Kuten nykyaikaisilla lisäaineilla, myös historiallisilla lisäaineilla on ollut useampia vaikutuksia laastiin. Härän verellä on laastia voitu värjätä, samalla se on vaikuttanut laastin sitkeyteen ja jäykistymisnopeuteen. [5]

Puolasta, Poznanin teknillisestä yliopistosta, löytyi yksi tutkimus liittyen proteiinin vaikutuksesta laastiin. Jasiczak ja Zielinski tutkivat vuonna 2006 miten jauhetut punasolut vaikuttavat sementtilaastiin. Jauhetut punasolut oli saatu teollisen käsittelyn tuotteena sian ja lehmän verestä. Materiaali oli hienoa jauhetta, jonka tilavuudesta 99 % koostui eläinproteiinista ja sen pääainesosana olivat punasolut. Tarkempaa kuvausta, miten materiaali oli valmistettu, ei kerrottu. Tutkimuksen mukaan jauhettujen punasolujen lisääminen aiheuttaa voimakkaan laastin ilmamäärän lisääntymisen. He väittävät, että vaikutus on lähes 10-kertainen sen aikaisiin kemiallisiin lisäaineisiin verrattuna. Ilmamäärän

lisääntymisen lisäksi laasti notkistuu, tilavuuspaino pienenee, taivutus- ja puristuslujuus pienenee, kutistuma kasvaa ja laastin pakkasenkestävyys paranee. [19]

Polysakkaridit paksuntavat laastia ja parantavat tartuntaa. Käymisreaktio esimerkiksi oluella ja hunajalla on ilmeisesti kiihdyttänyt myös karbonatisoitumista. Kalkin sammuksessa on joskus käytetty ohravettä, joka liisterin ohella lisää laastin lujuutta. [5]

3.2 Laastityypit

Laastit nimetään niissä käytettävän sideaineen perusteella. Yksittäisessä laastissa sideainetta on tyypillisesti yhtä tai kahta erilaista. Sideainevalinta vaikuttaa laastin pääominaisuuksiin. Seuraavassa on esitelty tyypillisimmät kivimuureissa, ja niiden korjauksissa, käytetyt laastityypit. [3]

3.2.1 Kalkkilaastit (K)

Kalkkilaastissa (K-laastissa) sideaineena toimii pelkästään ilmakalkki. Kovettuakseen kalkkilaastin on oltava kosketuksissa ilmaan. Kovettuminen tapahtuu kiteytymällä laastin karbonatisoituessa, eli kun ilman hiilidioksidi reagoi laastin sideainekalkin kanssa. Lisäksi kalkkilaasti tarvitsee kovettuakseen sopivan määrän kosteutta, mutta ei kuitenkaan vettä, täysin kuiva tai märkä laasti ei kovetu. Kalkkilaastin kovettuminen alkaa aina pinnasta ja hidastuu syvemmälle mentäessä. Tästä syystä paksujen valumuurien keskiosissa kalkkilaasti ei välttämättä kovetu kunnolla koskaan [4]. Kovettumisen alkuvaiheessa kalkkilaasti kutistuu paljon. Laasti on kuitenkin alkuvaiheessa melko plastista, minkä vuoksi kutistuminen synnyttää paljon huokosia, mutta ei merkittäviä halkeamia. Loppuvaiheen hitaan lujoudenkehityksen aikana kalkkilaasti ei enää kutistu merkittävästi. [3]

Kivimuurien alkuperäiset laastit ovat usein kalkkilaasteja. Viime vuosikymmenten tutkimuksissa on kiinnitetty huomiota laastien hydraulisiin ominaisuuksiin, ilmakalkista valmistetulla laasteilla ei hydraulisia ominaisuuksia ole eli laasti ei kovetu märkänä. Tutkimuksissa vanhoista kalkkilaasteista on tavattu hydraulisia ominaisuuksia, nämä ovat peräisin kalkinpoltossa syntyneistä epäpuhtauksista, jotka vaikuttavat kalkin kanssa hydraulisesti. Lisäksi laastiin on saatettu sekoittaa tarkoituksella esimerkiksi tiilimurskaa tai murskattua kuonaa. [1]

Laastit merkitään niiden koostumuksen perusteella kirjain- numeroyhdistelmällä. Laastin tunnus ilmoitetaan siten, että sideaineen tai sideaineiden määrä on 100 painoyksikköä ja runkoaineen määrä ilmoitetaan tätä 100 painoyksikön sideainemäärää kohti. Ilmakalkki-sideaineisella laastilla merkintä on muotoa K 100/800. Eli laastissa K 100/800 on 800 g runkoainetta 100 g sideainemäärää kohti. Joskus laastit halutaan suhteittaa tilavuusosia käyttäen, tällöin välimerkinä käytetään kaksoispistettä. Tilavuusmittaukset eivät kuitenkaan ole yhtä luotettavia kuin ainesosien punnitseminen. [3]

Hydraulisella kalkilla vahvistettu kalkkilaasti on käsitelty erikseen myöhemmin tässä luvussa.

3.2.2 Sementtilaastit (S)

Sementtilaastissa (S-laastissa) sideaineena toimii ainoastaan sementti. Sitoutuminen ja kovettuminen tapahtuvat sideainesementin reagoiessa veden kanssa. Reaktiossa syntyy hydrataatiotuotteita eli sementtigeeliä tai -pastaa. Kovettumisprosessissa hydrataatiotuotteista muodostuu jäykkä massa, joka vähitellen korvaa veden sementtihiukkasten välillä ja sitoo massan lujaksi rakenteeksi. [5] Sementtilaastin kutistuminen riippuu sen kuivumisnopeudesta, mutta tavallisesti sille on jo ehtinyt kehittyä lujuutta ennen kuin kutistuminen alkaa. Tästä syystä kutistumahalkeamien syntymisvaara on suurempi kuin K-laasteilla. Varsinkin kovettumisen ensimmäisten vuorokausien aikana laastin jälkihoito on tärkeää. Sementtilaasti kovettuu nopeasti ja saavuttaa suuren lujuuden, mutta toisaalta se on sellaisenaan huonosti työstettävää ja halkeiluriski sekä veden erottuminen ovat suuria. [3] Lisäksi sementtisineaine on verrattain tiivistä, eikä vesi pääse juuri kulkemaan sen läpi kuten kalkkisineaineessa [4]

Sementtilaasteja käytettiin muurinkorjauksissa 1900-luvulla. Enimmäkseen käytetty sementti oli kuitenkin muurausementtiä [7] (tunnus M), jonka eroa yleisimpään portland-sementtiin on käsitelty kappaleessa 3.1.1. Muurausementistä valmistettua laastia eli ns. Parmua käytettiin yleisesti muurinkorjauslaasteissa 1970–1990-luvuilla. Sen etuna oli hyvä pakkasenkestävyys, mutta se on niin tiukasti tarttuvaa, kovaa ja joustamatonta, että muurin myöhempi korjaus on hankalaa. [1] Parmulaastilla on Suomessa korjattu useita vanhoja linnoituksia, kuten Olavinlinnaa, Suomenlinnan puolustusmuureja ja Raaseporin linnan raunioita [4].

Sementtisineaineisilla laasteilla merkintä on muotoa S 100/300. Eli laastissa S 100/300 on 300 g runkoainetta 100 g sideainemäärää kohti. Sementtilaastit ovat yleensä lihavampia kuin kalkkilaastit eli niissä sideaineen määrä verrattuna runkoaineeseen on suurempi kuin kalkkilaasteissa. [7]

3.2.3 Kalkkisementtilaastit (KS)

Kalkkisementtilaastissa (KS-laastissa) sideaineena käytetään ilmakalkkia ja sementtiä. Näillä sideaineilla on täysin erilaiset ominaisuudet, mutta yhdessä ne toimivat erittäin hyvin. Kalkkisementtilaastin kovettuessa tapahtuu kaksi erilaista prosessia rinnan: kalkin hidas karbonatisoituminen ja sementin nopea hydratoituminen. Laastin ominaisuuksia voidaan säätää muuttamalla kalkki- ja sementtimäärien suhdetta. Sementtiosuuden kasvattaminen heikentää laastin työstettävyyttä ja lisää kutistumista, mutta toisaalta se kasvattaa lujuutta ja parantaa pakkasenkestävyyttä. Sementin osuus sideainemäärästä tulee olla vähintään 35 painoprosenttia, jotta se pystyy parantamaan K-laastin lujuutta. [3]

Kalkkisementtilaasteja on käytetty yleisesti muurinkorjauslaasteina 1990-luvulta lähtien. Tavallisin kalkin ja sementin suhde on 50/50. Viimeaikoina on kuitenkin siirrytty entistä kalkkipitoisempiin laasteihin. Esimerkiksi Tyrvään kirkon kunnostuksessa 2000-luvun alkupuolella käytetyssä laastissa sideaineesta 70 painoprosenttia oli kalkkia ja 30 sementtiä. [1]

Kalkkisementtisideaineisilla laasteilla merkintä on muotoa KS 65/35/600, jossa ensimmäinen numero kertoo kalkin, toinen numero sementin ja kolmas numero runkoaineen osuuden laastin kokonaispainosta. [3]

3.2.4 Hydraulisella kalkilla vahvistetut kalkkilaastit (KKh)

Hydraulisella kalkilla vahvistetuissa laasteissa (KKh-laastit) sideaineena on sekä ilma-kalkkia, että hydraulista kalkkia. KKh-laastit kovettuvat periaatteessa samalla tavalla kuin vähän sementtiä sisältävät KS-laastit. Oleellisia eroja laastien välillä kuitenkin löytyy. [3] Hydraulisen kalkin kovettumisnopeus on hitaampi ja vaikka se kasvattaakin kalkkilaastin lujuutta, niin sen loppulujuus on vain noin puolet sementin vastaavasta. Hydraulisessa kalkissa ei ole vesiliukoisia suoloja, ja sen kovettumisen myötä hydroksidia muodostuu alle kolmasosa sementin muodostamasta määrästä. [4]

Hydraulisella kalkilla vahvistettuja laasteja on käytetty jo vuosia Suomenlinnan korjauksissa. Myös Olavinlinnan korjauksissa on viimeaikoina siirrytty käyttämään kyseisiä laasteja. [1] Yksiselitteistä yleistä ohjetta hydraulisten kalkkilaastien reseptiin on miltei mahdoton antaa, laasti olisi hyvä suunnitella aina tapauskohtaisesti. Olavinlinnan muurinkorjauksissa käytetty pumppauslaasti on KKh 15/85/525-laastia. Kuten huomataan, hydraulista kalkkia tarvitaan kalkkilaastiin enemmän kuin sementtiä. [4]

4. KÄYTTÖOLOSUHTEIDEN JA TYÖTAPOJEN VAIKUTUS LAASTIEN TOIMINTAAN

Oikeanlaisilla työmenetelmillä ja käyttöolosuhteilla voidaan vaikuttaa voimakkaasti laastien toimintaan. Työmenetelmät ja olosuhteet tulisi ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa, näin voidaan varmistaa laastille suotuisat olosuhteet kaikissa tilanteissa. Pitää vain muistaa, ettei näiden vaikutus rajoitu pelkästään työskentelyhetkeen vaan menetelmillä ja olosuhteilla on suuri rooli myös laastin kovettuessa.

4.1 Korkeat ja alhaiset lämpötilat – suojaukset

Rakentamishetkellä korkeat lämpötilat, ja etenkin suora auringon paiste, voivat olla hyvinkin haitallisia laastille. Lämmön ja auringonpaisteen vuoksi laasti kuivuu liian nopeasti, joka saattaa aiheuttaa laastiin halkeilua ja sen seurauksena lujuuden heikkenemistä. Ongelma koskee erityisesti rappauksia, joissa on laaja haihtumispinta-ala ja ohut kerrospaksuus, mutta ei siltä vältytä myöskään muurinkorjauksissa vaikka haihtumispinta-ala on pieni ja kerrospaksuus tyypillisesti iso. Kuivan ja lämpimän ilman lisäksi tuuli nopeuttaa laastin kuivumista. Näinollen Suomessa lähinnä kesäaikaan tulisi laastin kuivumista hidastaa erilaisin suojauksin ja asianmukaisen jälkihoidon avulla. [3]

Yleinen ohje on, ettei laasteja saisi käyttää kun ilman ja ympäröivän rakenteen lämpötila on alle +5 °C [6]. Lämpötilan mennessä tämän alle voi laastissa tapahtua kaksi ilmiötä: sideaineen reaktiot saattavat hidastua, ja jopa pysähtyä kokonaan, tai laastissa oleva vesi saattaa jäätymä lämpötilan laskiessa edelleen. Täysin tuoreessa laastissa veden jäätyminen vaikuttaa lähinnä laastin huokosrakenteeseen. Jäättyessään laajentuva vesi kasvattaa huokosten kokoa ja samalla vähentää pienten huokosten määrää. Jos laasti on ehtinyt vähääkään kovettua, veden jäätyminen aiheuttaa laastiin hydraulista painetta. Paineen suuruus riippuu laastin vesipitoisuudesta. Mikäli laasti on kyllästynyt vedellä, eli sen kaikki huokokset ovat täynnä vettä, paine kasvaa nopeasti suuremmaksi kuin laastin sisäinen vetolujuus. Vetolujuuden ylitys aiheuttaa laastiin paikallisia murtumia, ns. varhaispakkasrapautumavaurioita, jotka ennen pitkää laajenevat näkyviksi vaurioiksi. Jos laastin vesimäärä on pienempi ja huokosrakenne oikeanlainen, vedellä on mahdollisuus laajeta ilman täyttämiin huokosiin, jolloin vauriot saattavat estyä. [3]

Yksinkertaisin, muttei ei halvin, vaihtoehto suojautua alhaisilta lämpötiloilta on tehdä työt täyden suojauksen alaisena lämmitetyssä tilassa. Käytännössä tämä tarkoittaa koko työn alla olevan kohdan suojaamista lämmitetyllä teltalla. Lisäkustannukset voivat tuntua merkittävilä, mutta saavutettu hyöty on myös suuri. Työskentelyolosuhteet saadaan vakioitua, jolloin säärasitukset eivät vaikuta työskentelyyn. Vakio-olosuhteissa laastien

vaurioitumisriski saadaan minimoitua ja vältetään muilta sääolosuhteiden tuomilta ikäviltä yllätyksiltä.

4.2 Laastien kovettumisnopeus eri lämpötiloissa

Sideainetyypistä riippumatta laastin kovettuminen hidastuu lämpötilan laskiessa. Ilmalkkasideaineiset laastit kovettuvat karbonatisoitueessaan. Karbonatisoituminen ei kuitenkaan pääse tapahtumaan mikäli laasti on täysin märkä. Lämpötilan laskiessa laastin kuivuminen hidastuu, jonka seurauksena karbonatisoituminen tapahtuu hitaasti jo +5-6 °C lämpötilassa, ja 0 °C:ssa se lakkaa käytännössä kokonaan. [3]

Sementtiseidaineisilla laasteilla sideaineen sitoutumisreaktiot hidastuvat lämpötilan laskiessa, joskin eri sementtilaatujen välillä voi olla eroja. Reaktioiden hidastumisen vuoksi myös lujuudenkehitys hidastuu. Esimerkiksi yhden muurauslaastin lujuudenkehitys on hidastunut alle puoleen lämpötilan laskiessa +20 °C:sta +5 °C:een, ja 0 °C:ssa lujuus putoo noin viidesosaan alkuperäisestä [23]. Sementin kovettuminen lakkaa käytännössä kokonaan -10 °C lämpötilassa. [3]

4.3 Laastin pumppaus/sullonta

Yleisin laastien pumppaamiseen käytettävä pumpputyyppi on ruuvipumppu. Tämän tyyppisen pumpun käyttö asettaa tiettyjä rajoitteita. Laastin tulee olla sopivan notkeaa, jotta se kulkee letkun läpi. Liian jäykkä massa saattaa tukkia pumpun/letkun, kun taas liian notkea massa on työstettävyyden kannalta huono. Käytetyn pumpun malli saattaa myös rajoittaa runkoaineen maksimiraekokoa. Pumpun mallista riippuen sen teho myös vaihtelee. Käytännössä teho vaikuttaa eniten nostokorkeuteen, eli siihen kuinka korkealle pumppu pystyy laasti pumppaamaan. Joskus pumpun saattaa joutua nostamaan siis telille lähemmäs korjattavaa kohtaa, jotta pumppaaminen onnistuu.

Muurinkorjauksissa pumpun aiheuttamaa painetta käytetään hyväksi muurin täyttämässä. Letku työnnetään muurin sisään johon laasti pumpataan sopivalla paineella, jotta se tunkeutuisi kaikkiin muurissa oleviin koloihin. Tämän lisäksi laastia tiivistetään sullo-malla puu- tai metallisauvan avulla. Sullomisen tarkoitus on poistaa laastista kaikki tiivistyshuokoset ja varmistaa laastin tunkeutuminen pienimpiinkin onkaloihin. Laastin tulee olla siis riittävän notkeaa tunkeutuakseen joka paikkaan, ja samalla riittävän jäykkää ettei se valu ulos muurista. Viimeaikaisissa laastitutkimuksissa muureissa on havaittu jonkin verran tiivistymättömiä ilmataskuja, mikä osoittaa nykyaikaisen tiivistystekniikan olevan osittain puutteellinen [11]. Pumpun paine ja käsivarainen sullonta ei siis riitä tiivistämään laastia täydellisesti. Uutena työmenetelmänä voisi koittaa varovaista tärytystä. Markkinoilla on olemassa pieniä akkukäyttöisiä betonin tiivistämiseen tarkoitettuja tärytinsauvoja, jotka voisivat soveltua muurinkorjauslaasteille. Täryn avulla voitaisiin tiivistää hieman jäykempikin laasti, jolloin laastin ei tarvitsisi olla juoksevaa tunkeutuakseen joka paikkaan.

4.4 Jälkihoito ja sen vaikutus

Jälkihoidolla on suuri merkitys laastin lopputuloksen kannalta. Asianmukaisella jälkihoidolla varmistetaan laastin riittävä tartunta sekä lujuus. Käytännössä jälkihoidon avulla estetään laastin liian nopea kuivuminen. Liian nopea kuivuminen saattaa aiheuttaa laastiin plastista halkeilua sekä laastin lujuuden ja kestävyysominaisuuksien heikkenemistä. [6]

Laasti on sideaineesta ja sovellutuksesta riippuen pidettävä kosteana joistakin vuorokausista useampaan viikkoon. Kriittisin aika on ensimmäiset vuorokaudet laastin levityksen jälkeen. Esimerkiksi tyypillisiä rappauslaasteja ohjeistetaan kostuttamaan 1-3 vuorokautta rappauksen jälkeen ja muurinkorjauksessa käytettävää pumppauslaastia ohjeistetaan kostuttamaan 2 viikkoa [10]. Joka tapauksessa laastin jälkihoitoa on jatkettava riittävän pitkä aika, jotta laasti ehtii saavuttamaan riittävän lujuuden kuivumiskutistumahalkeamia vastaan. [6]

Jälkihoito tehdään tyypillisesti vesisumutuksella. Tilanteesta riippuen kastelu voidaan osoittaa suoraan pintaan tai pinnan päälle voidaan asettaa kosteana pidettävä juuttikangas tai vastaava. Jälkihoito tulisi lopettaa vähentämällä vesisumutuksen määrää vähitellen. Liian nopea jälkihoidon lopettaminen saattaa aiheuttaa laastiin halkeilua. [6]

5. KOKEELLISET TUTKIMUKSET

Diplomityötä varten suoritettiin kokeellinen tutkimus Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy:n ja TTY:n rakennustekniikan laitoksen laboratoriotiloissa. Kokeelliset tutkimukset aloitettiin talvella 2015 ja viimeiset kokeet suoritettiin kesällä 2016. Koemenetelmät olivat pääosin voimassa olevien standardien mukaiset. Koemenetelmien pääkohdat on esitetty tässä kappaleessa.

5.1 Tutkimuksen taustaa ja tavoitteet

Valumuurirakenteiden korjaaminen ns. syvätyttömenetelmällä on aloitettu Suomessa 1970-luvulla. Korjauksissa käytettyjä laasteja on tutkittu melko vähän tähän mennessä. Kokemukset ovat kuitenkin osoittaneet, että korjausten alkuaikoina käytetyt sementtipitoiset laastit eivät ole toimineet halutulla tavalla. Tämän vuoksi on pikkuhiljaa alettu siirtymään yhä kalkkipitoisempiin korjauslaasteihin. Museoviranomaisten suosituksiin perustuen tällä hetkellä yleisimmin käytettäväksi laastiksi on valittu hydraulisella kalkilla vahvistettu kalkkilaasti, KKh-laasti. Viimeisimmissä laastitutkimuksissa [11] on kuitenkin havaittu KKh-laastin pakkasenkestävyyden olevan osittain puutteellinen.

Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli kehittää valumuurien korjauksissa käytettävän KKh-laastin pakkasenkestävyyssominaisuuksia. Pakkasenkestävyyden kannalta on tärkeää, että laastissa on riittävästi ja tasaisesti jakautuneen suojahuokoskokoluokan (\emptyset 0,05-0,8 mm) huokosia. Pakkasenkestävyyttä voidaan parantaa lisäaineilla, erityisesti huokostimilla. Valumuurirakenteet liittyvät kuitenkin usein historiallisesti arvokkaisiin kohteisiin, joissa lisäaineiden käyttöä pyritään välttämään. Tutkimuksen tavoitteena oli lisäksi osoittaa, ettei nykyinen huokostin jätä laastiin tai muuriin ylimääräisiä kemikaalijämiä, vaan sen lopputuotoksena ovat pelkät suojahuokosina toimivat ilmakuplat.

Tutkimuksessa otettiin huomioon myös laastin työstettävyyden ja pumpattavuus. Laastin lisähuokostaminen vaikuttaa laastin työstettävyyteen. Laastin tulee olla aina pumpattavaa ja muutenkin nykyiseen työtekniikkaan soveltuvaa. Tutkimuksen ja koetulosten perusteella oli tarkoitus luoda yksiselitteinen resepti pakkasenkestävän KKh-korjauslaastin valmistamiseksi.

5.2 Tutkimuksen valmistelu

Ennen varsinaisten laboratoriokokeiden aloittamista tutustuttiin jo olemassa olevaan tutkimustietoon ja valumuurien korjauslaasteihin liittyvään kirjallisuuteen. Lisäksi laastin valmistukseen ja korjausten käytännön toteuttamiseen käytiin tutustumassa Olavinlinnan muurinkorjaustyömaalla marraskuussa 2015.

5.3 Tutkitut laastit

Ennen laboratoriokokeita valittiin tutkittavat laastit. Tutkimuksissa käytettiin kolmea erityyppistä laastia. Seuraavassa käydään lyhyesti läpi käytettyjen laastien reseptit ja valmistus.

5.3.1 KKh-referenssilaasti

Referenssilaastiksi valittiin Olavinlinnan muurinkorjaustyömaalla käytetty pumppauslaasti KKh 15/85/525. Tähän Thorborg von Konowin reseptin perusteella valmistettuun KKh-laastiin verrattiin tutkimustuloksia. Laastin resepti saatiin työmaalta ja se oli seuraava:

- Hiekka 0-4 mm	37 l
- Hiekka 0-6 mm	15 l
- Kvartsi	4,5 l
- NHL	18 l
- Märkäkalkki	4 l
- Vesi	10–13 l

, jossa kvartsi = kvartsifilleri KV-NFQ 0-0,2 mm, NHL = St. Astier NHL 5, märkäkalkki valmistetaan teollisesti sammutetusta kalkista, jota muhitetaan vedessä vähintään 1 kk ennen korjauslaastin tekemistä, ja hiekkojen rakeisuuskäyrät ovat liitteen B mukaiset.

Korjauslaastin sekoitusaika on 10–15 min + 10 min. Suuret erät sekoitetaan tasosekoittimella ja pienet erät voidaan sekoittaa porakonevispilällä noudattaen reseptien sekoitusai-koja.

5.3.2 Modifioitu referenssilaasti

Referenssilaastia modifioitiin ja pyrittiin parantamaan sen pakkasenkestävyysominaisuuksia. Laasti valmistettiin muuten samalla reseptillä kuin referenssilaasti, mutta siihen lisättiin huokostinta. Laastista valmistettiin neljä erilaista versiota. Ensimmäisessä versiossa huokostimena käytettiin Semtu Oy:n toimittamaa synteettistä huokostinta MasterAir 102. Toisessa versiossa huokostimena käytettiin Semtu Oy:n toimittamaa vinsolhartsipohjaista huokostinta MasterAir 71. Kolmannessa versiossa kokeiltiin yhtä historiallista lisäainetta, kuivattua ja jauhettua naudan verta, jonka yhden tutkimuksen [19] perusteella voitiin olettaa toimivan huokostimen tavoin. Viimeisenä lisäaineena kokeiltiin koivutuhkaa.

Huokostimen määrä haettiin tuoreen laastin kokeiden perusteella, tavoitteena oli saada tuoreeseen laastiin noin 10 % ilmamäärä. Vertailun vuoksi toisella teollisella huokostimella tehtiin laastierä, jossa tavoiteltiin noin 15 % ilmamäärää tuoreessa laastissa.

Laastin ainesosat olivat samat kuin referenssilaastilla. Ainesosat, hiekat mukaan lukien, toimitettiin Olavinlinnan korjaustyömaalta. Ennen laboratoriokokeita ainesosista määritettiin tilavuuspainot. Ainesosien tilavuuspainot on esitetty taulukossa Taulukko 5.1.

Taulukko 5.1 Laastin ainesosien tilavuuspainot

Hiekka 0-4 mm [g/l]	Hiekka 0-6 mm [g/l]	Kvartsifilleri [g/l]	St. Astier NHL 5 [g/l]	Märkäkalkki [g/l]	Vesi [g/l]	Huokostin Master-Air 102 [g/l] (laimennettu 1:9)	Huokostin Master-Air 71 [g/l] (laimennettu 1:9)
1472,93	1352,10	1075,03	845,00	1185,22	1000,00	1003	1006

Modifioidut laastit valmistettiin Hobart-sekoittimella. Hobart-sekoittimen toimintaperiaate on esitetty kappaleessa 5.4.1. Laastin ainesosat mitattiin punnitsemalla tasalaatuisemman lopputuloksen saamiseksi. Laastia valmistettiin kerralla noin kaksi litraa ja laastin resepti oli seuraava:

- Hiekka 0-4 mm	1557 g	(1,06 l)
- Hiekka 0-6 mm	579 g	(0,43 l)
- Kvartsi	138 g	(0,13 l)
- St. Astier NHL 5	435 g	(0,51 l)
- Märkäkalkki	135 g	(0,11 l)
- Vesi	280 – 378 g	(0,28 – 0,38 l)
- Teollinen huokostin	0,01 – 0,20 p- % sideaineen määrästä	
- Historiallinen lisäaine	1,00 – 9,42 p- % sideaineen määrästä	

, jossa teollinen huokostin oli laimennettu veden kanssa suhteessa 1:9, eli 1 osa huokostinta ja 9 osaa vettä. Laimennettu huokostin sekoitettiin laastin sekoitusveteen ennen veden lisäystä kuiva-aineiden sekaan.

Hobart-sekoittimen astiaan lisättiin ensin hydraulinen kalkki, kvartsifilleri, karkeampi hiekka sekä suurin osa hienommasta hiekasta ja sekoitettiin. Lisättiin vesi, johon oli sekoitettu huokostin/historiallinen lisäaine, ja märkäkalkki. Massaa sekoitettiin 5 min. Lisättiin loput hienommasta hiekasta ja sekoittamista jatkettiin 5 min. Tarvittaessa laastin koostumusta säädeltiin lisäämällä vettä ruiskun avulla sekoittamisen loppuvaiheessa.

5.3.3 Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki

Kolmas tutkittava laasti oli Hyvinkään Betoni Oy:n toimittama valmis kalkkilaasti, johon lisättiin laboratoriossa hydraulinen kalkki, lopullisen laastin tavoite oli KKh 15/85/525. Hyvinkään betonin toimittama kalkkilaasti oli valmiiksi lisähuokostettua. Huokostimena

oli käytetty MicroAir-huokostinta (sama tuote kuin MasterAir 102). Kalkkilaastissa ilmamäärä oli ennen hydraulisen kalkin lisäämistä noin 10 %. Kalkkilaastiin käytetyn runkoaineen raejakauma pyrittiin saamaan mahdollisimman lähelle referenssilaastin vastaavaa. Laastin resepti kehitettiin yhteistyössä Hyvinkään betoni Oy:n kanssa ja se oli seuraava:

- Kalkkilaasti ~K 100/2200	1,5 l	(2280 g)
- St. Astier NHL 5	0,30 l	(254 g)
- Vesi	0,07 – 0,075 l	(70 – 75 g)

Hobart-sekoittimen astiaan lisättiin ensin valmis kalkkilaasti K 100/2200. Kalkkilaastin sekaan lisättiin hydraulinen kalkki sekä vesi, jonka jälkeen massaa sekoitettiin 10 min. Tarvittaessa laastin koostumusta säädeltiin lisäämällä vettä ruiskun avulla sekoittamisen loppuvaiheessa.

5.4 Kokeiden kulku

Kaikki laastikokeet pyrittiin suorittamaan ennalta tehdyn laastikoeohjelman mukaisesti. Koeohjelman tarkoituksena oli varmistaa kaikille eri aikoihin valmistetuille laastierille samat olosuhteet ja kovettumisajat, sillä niillä on suuri vaikutus kovettuneen laastin ominaisuuksiin. Kaikki eri laastikokeet pyrittiin tekemään keskenään saman ikäisille laasteille.

Koeohjelman mukaan laastiprismamuottien purku tehdään 2 vuorokauden iässä. Muottien purkamisen jälkeen laastiprismat siirretään jälkihoitoon RH 100 % olosuhteisiin. Jälkihoito lopetetaan kun prismat ovat 28 vuorokauden ikäisiä, jonka jälkeen kovettuneen laastin kokeet voidaan aloittaa. Jälkihoito RH 100 % olosuhteissa poikkeaa hieman standardien mukaisista ohjeistuksista. RH 100 % olosuhteet valittiin koska ne on helppo luoda ilmatiiviissä astiassa, jonka pohjalla on vettä. Prismat eivät kuitenkaan saa koskettaa veden pintaa vaan ne pitää nostaa ritilän avulla veden yläpuolelle.

Ilmakalkin karbonatisoituminen, eli ilmakalkkasideaineisen laastin kovettuminen, riippuu voimakkaasti ilman suhteellisesta kosteudesta, jonka vuoksi on tärkeää vakioida jälkihoito-olosuhteet. Vakioimalla jälkihoito-olosuhteet ja -ajat voitiin varmistua, että tutkitujen laastien ominaisuudet ovat keskenään vertailukelpoiset. Valitsemalla jälkihoito-olosuhteiksi RH 100 %: estettiin ilmakalkin kovettuminen, jolloin tutkitut laasti saivat lujuutensa vain hydraulisen kalkin kovettuessa. Tilanne on periaatteessa sama kuin syväällä valumuurissa, jossa kalkki ei välttämättä karbonatisoidu koskaan.

Kaikki laastit valmistettiin edellä esitettyjen reseptien ja ohjeiden mukaisesti. Laastikokeet jaoteltiin kahteen vaiheeseen, tuoreen laastin kokeisiin ja kovettuneen laastin kokeisiin. Heti laastin valmistuksen jälkeen tuoreesta laastista määriteltiin seuraavat asiat: leviämä, ilmapitoisuus, tilavuuspaino, sekoitusvesimäärä ja työstettävyyys. Tuoreen laastin kokeiden jälkeen laastista valettiin standardin mukaiset laastiprismat (40x40x160 mm³).

Prismoja säilytettiin laastikoeohjelman mukaisesti RH 100 % olosuhteissa, kunnes prismat olivat 28 vuorokauden ikäisiä. Tämän jälkeen kovettuneesta laastista selvitettiin seuraavat asiat: huokoisuusarvot, pakkasrasituksen sietokyky, lujuus sekä huokosrakenne. Tuoreen laastin kokeet on esitetty kappaleissa 5.4.2-5.4.5 ja kovettuneen laastin kokeet kappaleissa 5.4.6-5.4.9.

5.4.1 Laastin valmistus Hobart-sekoittimella

Kaikki laboratoriossa valmistetut laastit valmistettiin reseptien mukaisesti Hobart-sekoittimella. Hobart-sekoittimella voidaan valmistaa pieniä, keskenään tasalaatuisia, laastieräitä. Hobart-sekoittimen toimintaperiaate on periaatteessa vastaava kuin keittiön yleiskoneilla, se on vain jyrkempää tekoa. Vatkain pyörii kulhossa ns. planetaarista sekoitusliikettä, jossa vatkain pyörii akselinsa ympäri eri suuntaan kuin se pyörii sekoitusastiaa ympäri. Sekoitusliikkeen avulla ainesosat sekoittuvat erittäin hyvin yhteen. Hobart-sekoittimen tarvikkeineen on esitetty kuvassa 5.1.



Kuva 5.1 Hobart-piensekoitin

Hobart-sekoittimeen kuuluu rungon lisäksi irrotettava metallinen sekoitusastia ja vatkain.

Laastin valmistaminen aloitettiin punnitsemalla kaikki laastin ainesosat erillisiin astioihin. Aluksi vatkain ja sekoitusastia irrotettiin sekoittimesta. Ainesosat lisättiin Hobartin-sekoitusastiaan reseptien mukaisesti. Jotta sekoitusastian sai helposti kiinnitettyä sekoittimeen, tuli vatkaimen olla irti. Eli sekoitusastia kiinnitettiin sen pidikkeeseen ensin ja vasta tämän jälkeen kiinnitettiin vatkain. Ennen sekoittimen käynnistämistä nostettiin sekoitinastia yläasentoon sivussa olevan nostovivun avulla. Hobart-sekoittimessa on kaksi eri nopeutta, tässä työssä käytetyt laastit sekoitettiin hitaammalla nopeudella eli nopeussäätö oli asennossa 1. Kun laastia oli sekoitettu reseptin mukainen aika, pysäytettiin sekoitin, laskettiin sekoitusastia ala-asentoon, vatkain irrotettiin ja sekoitusastia irrotettiin pidikkeestä. Laastin jatkokokeet aloitettiin välittömästi laastin valmistuksen jälkeen.

5.4.2 Leviämä

Leviämän avulla voidaan arvioida tuoreen laastin notkeutta. Notkeus ei absoluuttisesti kerro sitä, kuinka tuore laasti käyttäytyy ammattimiehen käsissä, mutta se antaa kuitenkin kuvan laastin työstettävyydestä. Tuoreen laastin leviämä määriteltiin standardin SFS-EN 1015-3 mukaisesti iskupöytä kokeella. Kokeessa tarvittavat välineet ovat:

- Tuoretta laastia
- Iskupöytä
- Katkaistun kartion muotoinen rst- tai messinkimuotti (korkeus 60 mm, pohjan halkaisija 100 mm, yläpinnan halkaisija 70 mm)
- Kosteaa sieniä tai rättiä
- Sullontasauva
- Mittanauha / työntömitta
- Muurauskauha

Ennen kokeen suorittamista iskupöydän levy ja muotin sisäpinta kostutettiin sienellä tai rätilä. Muotti asetettiin keskeisesti iskupöydän levyille ja se täytettiin kahdessa osassa niin, että molemmat kerrokset tiivistettiin erikseen sullontasauvan avulla. Muotista pidettiin koko ajan kiinni, jottei se lähtenyt nousemaan. Ylimääräinen laasti poistettiin ja laastin pinta tasattiin muurauskauhan avulla. Levyn näkyvä pinta pyyhittiin puhtaaksi ja kuivaksi, jonka jälkeen muotti nostettiin varovasti pois kohtisuoraan ylös.

Koe suoritettiin pyörittämällä iskupöydän kampea 15 kierrosta, nopeudella 1 kierros sekunnissa. 15 kierroksen eli iskun jälkeen mitattiin laastin halkaisija kahdesta toisiaan vastaan kohtisuorasta suunnasta. Näiden kahden mittauksen keskiarvo oli laastin leviämän arvo. Kuvassa 5.2 on esitetty laastikartio ennen leviämäkokeen iskuja sekä 15 iskun jälkeen.



Kuva 5.2 Vasemmalla laastikartio ennen iskuja, oikealla levinnyt laasti 15 iskun jälkeen

5.4.3 Ilmapitoisuus ja tilavuuspaino

Laastin ilmapitoisuus vaikuttaa sekä tuoreen laastin, että kovettuneen laastin ominaisuuksiin. Liian suuri ilmamäärä alentaa laastin loppulujuutta ja liian pieni ilmamäärä kielii huonosta pakkasenkestävyydestä. Tuoreen laastin ilmapitoisuus määriteltiin standardin SFS-EN 1015-7 painemenetelmän mukaisesti. Kokeessa tarvittavat välineet ovat:

- Tuoretta laastia
- Sullontasauva
- Paperia / rättejä
- Ilmapitoisuusmittari, tilavuus 1 litra
- Ruiskupullo ja vettä
- Vaaka, tarkkuus min. 0,01 g
- Suorareunainen lasta

Kuvassa 5.3 on esitetty ilmapitoisuusmittausten välineistöä.



Kuva 5.3 Ilmapitoisuusmittari ja ruiskupullo

Laastin tilavuuspaino saatiin samalla kun määriteltiin laastin ilmapitoisuutta. Koe aloitettiin punnitsemalla ilmapitoisuusmittarin tyhjä paineastia vaa'alla, tulos kirjattiin ylös ja vaaka nollattiin astian painoon. Astia täytettiin tuoreella laastimassalla kolmessa kerroksessa, joista jokainen tiivistettiin erikseen. Ylin kerros täytettiin hieman astian reunojen yli, jolloin tiivistyksen jälkeen reunojen yli tuleva laasti poistettiin ja laastin pinta tasoitettiin lastan avulla. Astian reunat puhdistettiin paperin tai rätin avulla huolellisesti. Täytetty astia asetettiin vaa'alle, ja tuoreen laastin ominaispaino saatiin suoraan punnituksen avulla, mikäli vaaka oli nollattu tyhjän astian painolla. Ominaispaino ilmoitetaan yleensä yksikössä kg/m^3 .

Kun ominaispaino oli määritetty, ilmamäärämittarin kansi asetettiin tiiviisti paikoilleen ja lukittiin. Tämän jälkeen varmistettiin, että mittarin pääventtiili oli kiinni. Mittarin kannen ja laastin välinen tyhjätila täytettiin vedellä mittarin sivuilta löytyvien palloventtiilien kautta. Venttiilit suljettiin ja painekanteen pumpattiin ilmaa hieman mittarin alkumerkin yli. Vuotoventtiilin avulla osoitin säädettiin tarkasti alkumerkin kohdalle. Pääventtiili avattiin ja mittaria napautettiin kevyesti, jonka jälkeen ilmapitoisuus oli luettavissa mittarin asteikolta. Ilmapitoisuus ilmoitetaan yksikössä tilavuus- %.

5.4.4 Sekoitusvesimäärä

Laastin sekoitusvesimäärä vaikuttaa suoraan laastin työstettävyyssominaisuuksiin. Vesimäärä voidaan määrittää useammallakin tavalla. Yksinkertaisin tapa on punnita / mitata laastiin lisättävä vesimäärä. Tässä tutkimuksessa käsitellyille laasteille vesimäärän punnitseminen on kuitenkin hankalaa. Kalkkilaastissa käytetty kalkki on muhitettu vedessä, jolloin itse kalkkitahna sisältää jonkin verran vettä, joten vesimäärän tarkka punnitus ei onnistu. Tässä työssä sekoitusvesimäärä määritettiin kuivaamalla laastia mikroaaltouunissa, kokeessa tarvittavat välineet ovat:

- Tuoretta laastia
- Mikroaaltouuni
- Kahvilautanen (tai muu pieni astia)
- Vaaka, tarkkuus 0,01 g
- Uunikintaat
- Laastikauha

Koe aloitettiin punnitsemalla kahvilautanen, tulos kirjattiin ylös ja vaaka nollattiin lautasen painolle. Lautaselle annosteltiin noin 100 g tuoretta laastia, laasti kannattaa tasoittaa mahdollisimman ohueksi kerrokseksi, jolloin se kuivuu nopeammin. Näytelautanen asetettiin mikroaaltouuniin ja sitä lämmitettiin täydellä teholla 2 minuuttia. Tämän jälkeen näyte punnittiin, tulos kirjattiin ylös, ja mikroaaltouunin sisäpinta kuivattiin. Näytelautanen asetettiin uudelleen mikroaaltouuniin ja sitä lämmitettiin täydellä teholla 1 min, jonka jälkeen näyte punnittiin, tulos kirjattiin ylös, ja mikroaaltouuni kuivattiin. Tätä jatkettiin 1 min lämmitysajalla niin kauan kunnes näytteen paino ei enää muuttunut. Sekoitusvesimäärä laskettiin kaavalla:

$$\text{sekoitusvesimäärä} = 100 * \frac{\text{alkupaino} - \text{loppupaino}}{\text{laastin kuivapaino}}, \quad (1)$$

jossa sekoitusvesimäärän yksikkönä on paino- %.

5.4.5 Laastin työstettävyys ja pumpattavuus

Referenssilaastin työstettävyys ja pumpattavuus on todettu hyväksi laastia käyttäneen urakoitsijan puolesta. Kohtien 5.3.2 ja 5.3.3 mukaisten laastien työstettävyyttä ja pumpattavuutta arvioitiin aluksi omien havaintojen pohjalta. Työstettävyyttä arvioitiin leviämäkokeen ja muurauskauhatuntuman avulla ja sitä säädeltiin vesimäärää kontrolloimalla. Laastien leviämä pyrittiin saamaan samaksi kuin referenssilaastilla.

Laboratoriossa valmistettujen laastien pumpattavuutta ei testattu käytännössä tämän työn puitteissa. Tarkoituksena oli, että jos onnistutaan kehittämään pakkasenkestävä pumpauslaasti, niin sen reseptin mukainen testierä valmistetaan työmaalla ja kokeillaan pumpattavuutta työmaaolosuhteissa.

5.4.6 Koeprismojen huokoisuusarvot

Laboratoriotutkimuksissa koeprismoista määriteltiin seuraavat huokoisuusarvot: kapillaarinen vedenimukerroin, suojahuokossuhde ja kapillaari-imeytyspitoisuus. Huokoisuusarvojen määritysten laboratoriokeet sisältävät osittain samoja työvaiheita, joten kokeita tehtiin jonkin verran rinnakkain.

Kapillaarinen vedenimukerroin

Kapillaarinen vedenimukerroin kuvaa kuinka paljon laasti imee itseensä kapillaari-imussa vettä. Kapillaarinen vedenimukerroin kerroin määritellään hieman eri tavalla riippuen siitä, onko kyseessä korjauslaasti vai ns. tavallinen laasti. Tässä tutkimuksessa kapillaarinen vedenimukerroin määriteltiin vertailun vuoksi molemmilla tavoilla. Kapillaarisen vedenimukertoimen määrittämisessä noudatettiin standardia SFS-EN 1015-18. Kokeessa tarvittavat välineet ovat:

- Koekappaleet (keskeltä katkaistut standardin mukaiset laastiprisman puolikkaat)
- Kuivausuuni
- Vaaka, tarkkuus 0,01 g
- Vesiastia, syvyys min 20 mm
- Taulusieni tai rätti
- Vesihöyryn tiivis teippi tai kupu vesiastialle

Koe aloitettiin katkaisemalla standardin mukaiset laastiprismat keskeltä, jolloin yhdestä prismasta saatiin kaksi 40x40x80 mm³ kokoista koekappaletta. Koekappaleita kuivattiin uunissa 60 °C lämpötilassa 2 vuorokautta ja kolmas vuorokausi 105 °C lämpötilassa. Kuivatuksen jälkeen näytteet punnittiin (kuumina heti uunista ottamisen jälkeen). Kuivapainot (M0) kirjattiin ylös 0,01 g tarkkuudella. Kappaleet asetettiin pystyyn astiaan, katkaistu puoli alaspäin, ja astiaan laskettiin vettä niin, että näytteen päästä 5-10 mm oli veden peitossa. Ajanotto aloitettiin kun vesi oli laskettu astiaan, samalla astia peitettiin

kuvun avulla, jottei näytteen vaippapinnalta vesi pääse haihtumaan ulos laastista. Astiaan lisättiin vettä kokeen aikana niin, että veden pinta oli koko ajan 5-10 mm korkeudella. 10 minuutin kuluttua näytteet punnittiin ja painot (M1) kirjattiin ylös 0,01 g tarkkuudella. Seuraava punnitus tehtiin 90 minuutin kohdalla ja painot (M2) kirjattiin ylös 0,01 g tarkkuudella. Viimeinen punnitus tehtiin 24 tunnin jälkeen ja painot (M3) kirjattiin ylös 0,01 g tarkkuudella. Heti viimeisen punnituksen jälkeen näytteet halkaistiin pituussuunnassa keskeltä ja veden tunkeumasyvyyks mitattiin 1 mm tarkkuudella. Kapillaarinen vedenimukerroin C laskettiin kaavoilla:

$$C = 0,625(M3 - M0) \text{ [kg/m}^2\text{]}, \quad (\text{korjauslaasteilla}) \quad (2)$$

$$C = 0,1(M2 - M1) \text{ [kg/m}^2\text{min}^{0,5}\text{]}, \quad (\text{muilla laasteilla}) \quad (3)$$

joissa M0 on koekappaleen kuivapaino, M1 on koekappaleen paino 10 minuutin kapillaari-imun jälkeen, M2 on koekappaleen paino 90 minuutin kapillaari-imun jälkeen ja M3 on koekappaleen paino 24 tunnin kapillaari-imun jälkeen grammoina.

Suojahuokossuhde ja kapillaari-imeytyspitoisuus

Suojahuokossuhteen avulla voidaan arvioida kovettuneen laastin pakkasenkestävyyttä. Suojahuokossuhde kuvaa kapillaarisesti täyttymättömien huokosten osuutta laastissa. Suojahuokossuhde ei kerro kuitenkaan mitään huokosten koosta tai huokosjaosta. Näytteellä voi olla suuri suojahuokossuhde, jonka vuoksi se voidaan mieltää pakkasenkestäväksi. Kuitenkin pahimmassa tapauksessa näytteen huokokset ovat kaikki suuria tiivistys-huokosia, jolloin näytteen todellinen pakkasenkestävyys on heikko. Suojahuokossuhteen määrittämisen lisäksi on tehtävä lisätutkimuksia, mikäli halutaan luotettavasti määrittää laastin pakkasenkestävyys. Kovettuneen laastin suojahuokossuhde määriteltiin soveltaen standardia SFS 4475. Kokeessa tarvittavat välineet ovat seuraavat:

- Koekappaleet (standardin mukaiset laastiprismat)
- Vesisäilytysastia
- Vaaka, tarkkuus 0,01 g
- Kuivausuuni
- Alipainesäiliö, tyhjiöpumppu, painemittari ja vesisäiliö
- Taulusieni tai rätti

Suojahuokossuhteen määrittäminen aloitettiin selvittämällä näytteiden kapillaaripaino, jonka vuoksi näytteet asetettiin vesiupotukseen. Näytteitä säilytettiin vesiupotuksessa vähintään 3 vuorokautta, jonka jälkeen näytteiden pinta kuivattiin mattakosteaksi kostean sienien tai rätin avulla ja näytteet punnittiin. Kapillaaripainot kirjattiin ylös 0,01 g tarkkuudella. Punnitusten jälkeen selvitettiin näytteiden kuivapaino. Näytteitä kuivattiin uunissa 60 °C lämpötilassa 2 vuorokautta ja kolmas vuorokausi 105 °C lämpötilassa. Kuivatuksen jälkeen näytteet punnittiin (kuumina heti uunista ottamisen jälkeen). Kuivapainot kirjattiin ylös 0,01 g tarkkuudella. Punnitsemisen jälkeen selvitettiin näytteiden tyhjöpaino. Näytteet

asetettiin alipainesäiliöön, johon imettiin tyhjiöpumpun avulla tyhjiö. Näytteitä pidettiin tyhjiöimussa noin 8 tuntia, jonka jälkeen säiliöön laskettiin vettä niin paljon, että näytteet peittyivät kokonaisuudessaan. Näytteitä pidettiin vesiupotuksessa 3 vuorokautta, jonka jälkeen näytteiden pinta kuivattiin mattakosteaksi ja näytteet punnittiin. Tyhjiöpainot kirjattiin ylös 0,01 g tarkkuudella. Lopuksi suojahuokossuhde laskettiin kaavalla:

$$\text{suojahuokossuhde} = \frac{\text{tyhjiöpaino} - \text{kapillaaripaino}}{\text{tyhjiöpaino} - \text{kuivapaino}}. \quad (4)$$

Kapillaari-imeytyspitoisuus kuvaa laastin kapillaarihuokoisuutta ja siten myös laastin tiiveyttä. Edellä esitellyllä koemenettelyllä voidaan samalla määrittää näytteiden kapillaari-imeytyspitoisuus, joka lasketaan kaavalla:

$$\text{"kapillaari - imeytyspitoisuus"} = 100 * \frac{\text{kapillaaripaino} - \text{kuivapaino}}{\text{kuivapaino}}. \quad (5)$$

5.4.7 Jäädytys-sulatuskoe

Jäädytys-sulatuskokeella saadaan lisätietoa kovettuneen laastin pakkasenkestävyydestä. Kokeella simuloidaan näytteelle tulevaa pakkasrasitusta. Kokeessa tarvittavat välineet ovat:

- Koekappaleet (standardin mukaiset laastiprismat)
- Jäädytys-sulatuslaitteisto, jolla saadaan aikaa peräkkäisiä jäädytyksiä ilmassa -20 °C lämpötilassa ja sulatuksia vedessä +20 °C lämpötilassa
- Vaaka, tarkkuus 0,01 g

Jäädytys-sulatuskokeessa koekappaleina käytettiin kovettuneita laastiprismoja. Ennen jäädytys-sulatussyklin aloittamista laastiprismat kyllästettiin vedellä kunnes painon muutos oli alle 0,5 % tai kunnes 14 vrk kyllästysaika tuli täyteen. Vedellä kyllästetyt prismat punnittiin ja asetettiin jäädytys-sulatuslaitteistoon. Prismojen lämpötila laskettiin -20 °C lämpötilaan, jossa niitä pidettiin 1 tunti. Tunnin jälkeen laitteistoon laskettiin vettä siten, että vesi peitti prismat. Veden lämpötila ei alussa saanut ylittää +40 °C ja sulatusjakson lopussa veden lämpötila tuli olla noin +20 °C. Sulatusvaihetta jatkettiin niin pitkään, että prismojen lämpötila oli +20 °C. Tämän jälkeen vesi laskettiin pois ja aloitettiin uusi jäädytys. Jäädytys-sulatusjaksoa toistettiin maksimissaan 50 sykliä. Prismoja tarkkailtiin aina 10 syklin välein, jolloin ne punnittiin ja vaurioita havainnoitiin silmämääräisesti. Mikäli ennen 50 syklin täyttymistä havaittiin selkeitä merkkejä jäätymisestä aiheutuvista vaurioista, koe keskeytettiin.

Jäädytys-sulatuskokeen aiheuttamia vaurioita tutkittiin sekä silmämääräisesti, että rinnakkaiskokein. Jäädytys-sulatuskokeessa olevista kappaleista määriteltiin kappaleen 5.4.8 mukaisesti lujuusarvot. Tämän lisäksi lujuudet määriteltiin samasta laastierästä valmistetuille rinnakkaisnäytteille. Rinnakkaisnäytteet olivat olleet vesiupotuksessa siitä

lähtien kun rasitettujen prismojen vedellä kyllästäminen aloitettiin. Jotta rinnakkaisnäytteiden ja pakkasrasitettujen näytteiden kosteuspitoisuus olisi sama, niin kaikki näytteet siirrettiin RH 75 % olosuhteisiin 7 vuorokaudeksi pakkasrasituksen päätyttyä. Kosteuspitoisuus vakioimalla, ennen kuormituskokeita, saatiin selville pakkasrasituksen mahdollisesti aiheuttamat vauriot. Vaurioita arvioitiin pakkasrasituksessa olleiden ja vertailunäytteiden taivutuslujuuksien suhteella. Laasti voidaan todeta pakkasenkestäväksi mikäli pakkasrasitettujen taivutuslujuus $\geq 2/3$ vertailunäytteiden taivutuslujuudesta.

5.4.8 Koeprismojen lujuus

Kovettuneesta laastista selvitettiin taivutus- ja puristuslujuus standardin SFS-EN 1015-11 mukaisesti. Kokeessa tarvittavat välineet ovat:

- Standardin mukaisia laastiprismoja
- Standardin mukainen kuormituslaitteisto

Käytössä olleella kuormituslaitteistolla määritettiin laastiprismoista sekä taivutus- että puristuslujuus. Ennen kuormituskokeiden aloittamista varmistettiin, että laitteiston asetukset oli säädetty oikean kokoiselle kappaleelle ja kuormitusnopeus on oikea laastin arvioituun lujuuteen. Kuvassa 5.4 on taivutus- ja puristuslujuuskokeiden kuormituslaitteisto.



Kuva 5.4 Laastiprismojen kuormituslaitteisto

Koe aloitettiin määrittämällä taivutuslujuus. Laastiprisma asetettiin laitteen taivutuslujuutta mittaavaan osaan siten, että laite taivuttaa prisman poikki mahdollisimman läheltä sen keskikohtaa. Kun prisma oli kahdessa osassa, määriteltiin molemmille päille erikseen puristuslujuus. Päät asetettiin omalla vuorollaan laitteen puristuslujuutta mittaavaan osaan ja kappaleet kuormitettiin murtoon asti. Molemmat kuormitukset tapahtuvat automaattisesti ja laite ilmoittaa murtumiseen tarvittavan maksimivoiman (kN), sekä laastin taivutus- ja puristuslujuuden (MPa). Varmistukseksi, että asetukset kappaleen koolle olivat oikein, taivutus- ja puristuslujuus laskettiin vielä käsin.

Taivutuslujuus laskettiin kaavalla:

$$f = 1,5 * \frac{Fl}{bd^2}, \quad (6)$$

jossa F on taivutuksessa koekappaleeseen kohdistettu suurin kuorma [N], l on tukirullien akselien välinen etäisyys [mm] ja b:n ja d:n arvoina voidaan käyttää prismamuotin sisämittoja [mm].

Puristuslujuus laskettiin kaavalla:

$$f_m = \frac{F}{bd}, \quad (7)$$

jossa F on puristuksessa koekappaleeseen kohdistettu suurin kuorma [N] ja b:n ja d:n arvoina voidaan käyttää prismamuotin sisämittoja [mm].

5.4.9 Huokosrakenne ohuthienäytteen perusteella

Tähän työhön liittyvät ohuthietutkimukset teetettiin Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy:ssä Vantaalla. Halutuista laastieristä lähetettiin ohuthietutkimuksiin noin 75 mm pitkä kappale kovettuneesta laastiprismasta. Ohuthietutkimusten avulla haluttiin selvittää, pak-
kasenkestävyyden kannalta tärkeä, näytteiden huokosrakenne.

Ohuthietutkimuksissa näytteestä valmistetaan ohuthie erikoislaboratoriomenetelmin. Ohuthie on noin 0,025 mm paksu, valoa läpäisevä näyteleike, jota tutkitaan polarisaatiomikroskoopilla. Mikroskoopin avulla saadaan laastin huokosrakenteen lisäksi muitakin asioita kuten runko- ja sideainekontaktien laatu tai mikrosäröily ja –halkeilu. Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy toimitti valmiit tutkimusselostukset, joissa on esitetty kaikki ohuthietutkimuksen havainnot.

5.5 KKh-referenssilaastin ominaisuuksien mittaukset

KKh-referenssilaastina oli Olavinlinnan muurinkorjaustyömaan pumppauslaasti. Näyte-erät laastista saatiin samasta laastierästä, jota käytettiin sen hetkisiin muurinkorjauksiin marraskuussa 2015. Laastiresepti on esitetty kappaleessa 5.3.1.

Laastista saatiin kaksi erillistä näyte-erää. Ensimmäinen näyte-erä otettiin suoraan tasosekoittajasta ja sille tehtiin vain tuoreen laastiin kokeet. Suoraan tasosekoittajasta otetun näyte-erän sekoitusaika oli mahdollisesti hieman ohjeellista lyhempi. Toinen näyte-erä saatiin pumpun läpi menneestä laastista ja sille tehtiin ensin tuoreen laastin kokeet, joiden jälkeen laastista valettiin yhteensä 12 laastiprismaa (40x40x160 mm³) jatkotutkimuksia varten. Tuoreen laastin kokeet tehtiin Olavinlinnan työmaalla. Laastin jälkihoito

ja osa kovettuneen laastin kokeista suoritettiin Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy:n laboratoriotiloissa Tampereella ja loput kovettuneen laastin kokeet suoritettiin TTY:n rakennustekniikan laitoksen laboratoriotiloissa.

5.5.1 Tuoreen laastin ominaisuudet

Tuoreesta laastista määriteltiin leviämä, ilmapitoisuus, ominaispaino ja sekoitusvesimäärä välittömästi laastin valmistuksen jälkeen. Taulukossa 5.2 on esitetty referenssilaastin ominaisuudet tuoreessa laastissa.

Taulukko 5.2 Referenssilaastin ominaisuudet tuoreessa laastissa

Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Tuoreen laastin leviämä [mm]	Tuoreen laastin ilmapitoisuus [til-%]	Tuoreen laastin ominaispaino [kg/m ³]	Laastin sekoitusvesimäärä [%]
KKh 15/85/525	A	150	3,4	2125,15	15
	B	155	4,0	2099,87	16

Laastierä A otettiin suoraan tasosekoittajasta, jolla laasti valmistettiin. Laastin sekoitus-aika oli mahdollisesti hieman ohjeellista lyhempi, joten tuloksiin tulee suhtautua varauksella. Laastierästä A ei tehty koeprismoja kovettuneen laastin kokeita varten.

Laastierä B pumpattiin kertaalleen pumpun läpi. Laasti otettiin letkun päästä, jolla muurinkorjausta suoritettiin työmaalla. Laastierä B valmistettiin noudattaen työmaalla ollutta reseptiä sekoitusaikoineen. Tästä laastierästä valmistettiin 12 laastiprismaa jatkotutkimuksia varten.

5.5.2 Laastin työstettävyyys ja pumpattavuus

Referenssilaastin työstettävyyttä ja pumpattavuutta arvioitiin työmaalla urakoitsijan kanssa. Laastin työstettävyyys säädeltiin veden määrän kontrolloinnilla. Vesimäärää ei mitattu tarkasti, vaan vettä lisättiin sen mukaan, miten jäykkää laastia haluttiin. Laasti, joka valmistettiin, edusti ”normaalia” pumppauslaastia.

Urakoitsijan edustajan mukaan laastin pumpattavuus on yleisesti hyvällä tasolla, tosin välillä laasti tukkii letkun. Ennen laastin pumppaamista letkun läpi on pumpattava hydraulisesta kalkista ja vedestä valmistettu tahna letkun voiteluaineeksi. Laastin muurauskauhatuntuma vastasi jäykähköä laastia.

5.5.3 Koeprismojen huokoisuusarvot

Kovettuneista koeprismoista määriteltiin laastin kapillaarisuutta ja huokosrakennetta kuvaavat suureet. Laastiprismoja tehtiin vain laastierästä B, joten kovettuneen laastin kokeet tehtiin vain tälle laastierälle. Tulokset on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3 Kovettuneen laastin kapillaarisuutta ja huokosrakennetta kuvaavat suureet

Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/m ²]	Kapillaarinen vedenimu-kerroin [kg/(m ² min ^{0,5})]	Kapillaari-imeytys-pitoisuus [p-%]	Suojahuokos-suhde
KKh 15/85/525	A	-	-	-	-
	B	20,12	1,23	13,45	0,10

Tässä tutkimuksessa käytettävät laastit ovat korjauslaasteja, joten taulukossa kapillaarisen vedenimukertoimen ensimmäinen arvo (yksikkö kg/m²) on standardin mukainen arvo. Vertailun vuoksi kapillaarinen vedenimukerroin määriteltiin myös ns. normaalin laastityypin mukaisesti.

Suojahuokossuhteen avulla voidaan arvioida laastin pakkasenkestävyyttä. Suojahuokossuhteen ollessa yli 0,20 voidaan arvioida laastin mahdollisesti olevan pakkasenkestävää, lopullinen pakkasenkestävyys pitää kuitenkin todeta lisäkokeiden avulla.

5.5.4 Jäädytys-sulatuskoe

Jäädytys-sulatuskokeeseen valittiin kolme laastiprismaa, joiden tunnuksot olivat B6, B7 ja B8. Ennen kokeen aloittamista kappaleet kyllästettiin vedellä. Tämä vedellä kyllästys-aika oli 17 vuorokautta, eli se ylitti hieman ohjeellisen maksimajan 14 vuorokautta.

10 syklin jälkeen näytteiden pinnoilla oli havaittavissa hieman minimaalista pintarapautumaa. Näytteiden painot olivat pääosin nousseet hieman, keskimäärin 0,03 % alkuperäisestä.

20 syklin jälkeen pintarapautumat olivat hieman laajentuneet ja lisääntyneet, mutta muita näkyviä vaurioita ei vielä ollut havaittavissa. Näytteiden painot olivat nousseet jälleen hieman, keskimäärin 0,15 % alkuperäisestä.

30 syklin jälkeen pintarapautuman lisäksi näytteiden kulmat olivat pehmenneet ja osa kulmista oli rapautunut pois. Näytteiden painot olivat rapautumasta huolimatta keskimäärin 0,16 % suuremmat kuin alkuperäiset painot.

40 syklin jälkeen näytteiden pinnalla oli jo selkeää pintarapautumaa. Kahdesta näytteestä pinta oli rapautunut miltei kokonaan pois ja kolmannelta osittain. Näytteiden kulmat olivat rapautuman johdosta pyöristyneet. Kahdessa eniten rapautuneesta näytteestä paino oli pudonnut keskimäärin noin 5,3 % alkuperäisestä painosta. Parhaiten säilyneen näytteen paino oli pudonnut vain 0,36 % alkuperäisestä.

50 syklin jälkeen kaikkien näytteiden pinnasta oli rapautunut kerros laastia pois. Näytteiden reunat olivat selkeästi pyöristyneet ja näytteiden poikkipinta-ala oli pienentynyt alkuperäisestä. Näytteiden painot olivat pienentyneet keskimäärin 16,5 % alkuperäisestä painosta. Kuvasta 5.5 näkee miten pakkasrasituksen 50 sykliä on vaikuttanut laastipris-moihin. Lähtötilanteessa rasitetut prismat ovat olleet samannäköisiä kuin vertailuprismat.



Kuva 5.5 Vasemmalla pakkasrasituksessa olleet ja oikealla vertailuprismat

Pakkasrasitus lopetettiin kun 50 sykliä tuli täyteen. Pakkasrasituksen jälkeen näytteistä määritettiin lujuusarvot. Ennen lujuuskokeita sekä rasitetut näytteet, että vertailunäytteet siirrettiin 7 vuorokaudeksi RH 75 % olosuhteisiin, jotta näytteiden kosteuspitoisuudet tasaantuisivat samoiksi. Seitsemän vuorokauden jälkeen näytteistä määritettiin lujuusarvot, tulokset on esitetty kappaleessa 5.5.5.

5.5.5 Koeprismojen lujuus

Koeprismojen lujuus määriteltiin yhteensä kuudelle näytteelle. Näytteistä kolme oli ollut jäädytys-sulatuskokeessa 50 sykliä, ja kolme oli vertailunäytteitä, jotka eivät olleet pakkasrasituksessa. Kuormitushetkellä näytteet olivat 92 vuorokauden ikäisiä. Taulukossa 5.4 on esitetty tulokset lujuuskokeista.

Taulukko 5.4 Pakkasrasitettujen ja vertailunäytteiden lujuudet, näytteiden ikä 92d.

Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Taivutuslujuus [MPa], PAKKASRASITETUT NÄYTTEET	Taivutuslujuus [MPa], VERTAILUNÄYTTEET	Taivutuslujuus-suhde	Puristuslujuus [MPa], PAKKASRASITETUT NÄYTTEET	Puristuslujuus [MPa], VERTAILUNÄYTTEET
KKh 15/85/525	A	-	-	-	-	-
	B	0,32	1,30	0,25	1,00	5,62

Kuormituskokeiden jälkeen selvitettiin näytteiden kosteuspitoisuudet. Kosteuspitoisuus vaikuttaa näytteiden lujuuksiin, joten rasitettujen ja vertailunäytteiden kosteuspitoisuus tulisi olla sama luotettavan vertailun vuoksi. Kosteuspitoisuus määriteltiin punnitsemalla kuormituskokeiden jälkeen jäljelle jääneet kappaleet välittömästi kuormituksen jälkeen. Seuraava punnitus tehtiin, kun näytteet olivat olleet uunissa 105 °C lämpötilassa kolme vuorokautta. Näytteiden kosteuspitoisuus laskettiin kaavalla:

$$\text{kosteuspitoisuus} = 100 * \frac{m_1 - m_0}{m_0}, \quad (8)$$

jossa m_1 on kappaleiden paino välittömästi kuormituskokeiden jälkeen ja m_0 on kappaleiden kuivapaino uunikuivauksen jälkeen.

Rasitettujen näytteiden kosteuspitoisuus oli 3,1 % ja vertailunäytteiden 3,9 %. Kosteuspitoisuudet ovat hyvin lähellä samat, joten lujuudet ovat vertailukelpoisia.

Taivutuslujuuksien suhde (pakkasrasitetut / vertailunäytteet) oli 0,25 eli 1/4. Pakkasenkestävälle laastille taivutuslujuuksien suhde tulisi olla $\geq 2/3$. Tämän perusteella referenssilaastia ei voida jäädytys-sulatuskokeen perusteella mieltää pakkasenkestäväksi.

5.5.6 Huokosrakenne ohuthienäytteen perusteella

Ohuthietutkimuksen tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä C. Ohuthietutkimuksen tulokset ovat pääpiirteissään seuraavat:

- Laastin karbonatisoitumisaste on hyvin alhainen.
- Laastissa esiintyy suhteellisen harvaksen pieniä pallomaisia suojahuokoskokoluokan ilmahuokosia, jotka voivat antaa jonkinasteista pakkasenkestävyyttä. Lisäksi esiintyy yleisemmin kookkaampia, epämääräisen muotoisia tiivistyshuokosia.
- Ilman määrä on silmämääräisen arvion perusteella 3-5 %.
- Huokostilojen seinämissä on muutamien paikoin ohuehkoja portlandiittikiteymiä.
- Sideainepastassa on muutamien paikoin lähes tiiviitä mikrosäröjä, jotka ovat voineet syntyä näytteiden katkaisun yhteydessä.

Ohuthietutkimuksen perusteella laastia ei voida täysin mieltää pakkasenkestäväksi. Laastissa on kuitenkin harvakseltaan suojahuokoskokoluokan ilmahuokosia, jotka voivat antaa laastille paikallista pakkasenkestävyyttä.

5.6 KKh-referenssilaastin modifiointi ja ominaisuuksien mittaustaus

Modifioidun referenssilaastin valmistus, jälkihoito ja laastikokeet suoritettiin pääosin TTY:n rakennustekniikan laboratoriossa. Laastin valmistukseen käytettiin Hobart-sekoitinta, jolla valmistettiin noin kaksi litraa laastia kerralla. Kaikki ainesosat punnittiin tarkasti tasalaatuisen laastin valmistamiseksi.

Päätavoitteena oli parantaa referenssilaastin pakkasenkestävyyttä käyttämällä lisäaineena huokostinta. Huokostimen määrä haettiin tuoreen laastin kokeiden, ja erityisesti tuoreen laastin ilmamäärän avulla. Tuoreen laastin ilmamäärä pyrittiin kasvattamaan 10 %:iin. Tämän lisäksi vertailun vuoksi tehtiin yksi laastierä, jossa ilmamääräksi tavoiteltiin 15 %:a. Liitteessä on taulukoitu kaikki käytetyt reseptivariaatiot ja tehtyjen laastikokeiden tulokset, tässä kappaleessa esitetään vain niiden laastierien tulokset, joista valettiin laastiprismoja ja tehtiin jatkotutkimuksia.

Laastin valmistus aloitettiin tekemällä ns. 0-sarja referenssilaastin reseptiä noudattaen (pl. sekoitusaika). 0-sarjalle tehtiin vain tuoreen laastin kokeet. Tuloksia verrattiin referenssilaastin vastaaviin. Näin todettiin, että valittu laastisekoitin ja sekoitusaika (5 min + 5 min) tuottavat vastaavan tuoreen laastin kuin referenssilaasti.

Referenssilaastin reseptiä modifioitiin kahdella eri teollisella huokostimella ja kahdella historiallisella lisäaineella. Ensimmäisessä vaiheessa huokostimena käytettiin Semtu Oy:n toimittamaa synteettistä huokostinta MasterAir 102 ja toisessa vaiheessa Semtu Oy:n toimittamaa vinsolhartsipohjaista huokostinta MasterAir 71. Kolmannessa vaiheessa huokostimena kokeiltiin kuivattua ja jauhattua naudan verta, jonka yhden tutkimuksen [19] perusteella voitiin olettaa toimivan huokostimen tavoin. Viimeisessä vaiheessa kokeiltiin vielä koivutuhkan huokostavaa vaikutusta.

MasterAir 102

Huokostimen määrät ovat hyvin pienet, ohjeen mukaan 0,03 - 0,3 % sideaineen painosta. MasterAir 102 laimennettiin veteen suhteessa 1:9, jotta voitiin saavuttaa haluttu mittatarkkuus. Kokeet aloitettiin lisäämällä laastiin 0,01 p- % huokostinta, jonka jälkeen määrää kasvatettiin pienin lisäyksin, kunnes haluttu ilmamäärä saavutettiin. Maksimissaan huokostinta lisättiin 0,20 p- %. Taulukossa 5.5 on esitetty niiden laastierien ainesosien määrät, joista valettiin laastiprismoja ja tehtiin jatkotutkimuksia.

Taulukko 5.5 Laastierien ainesosien määrät, huokostimena MasterAir 102

Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Hiekka 0-4 mm [g]	Hiekka 0-6 mm [g]	Kvartsifilleri [g]	St. Astier NHL 5 [g]	Märkäkalke [g]	Vesi [g]	MasterAir 102 [p-% sideaineesta]	MasterAir 102 [g] (laimennettu 1:9)
KKh 15/85/525 + Master-Air 102	G1	1557	579	138	435	135	290	0,09	5,13
	G2	1557	579	138	435	135	290	0,09	5,13
	H3	1557	579	138	435	135	280	0,20	11,49
	H4	1557	579	138	435	135	280	0,20	11,49

MasterAir 71

Huokostimen MasterAir 71 ohjeellinen annostus on 0,03 - 0,1 % sideaineen painosta. MasterAir 71 laimennettiin veteen suhteessa 1:9. Kokeet aloitettiin lisäämällä miltei ohjeistuksen maksimimäärä huokostinta, 0,09 p- %. Huokostimen määrää kasvatettiin pienin lisäyksin 0,17 p- % asti, jolloin todettiin, ettei tuolla annostuksella ilmamäärä noussut juuri ollenkaan. Tästä heräsi epäily, että toimiiko tämä huokostin reseptin mukaisessa laastissa oikein. Lopuksi testattiin vielä ”katastrofitilanne”, eli laastiin lisättiin 1,00 p- % huokostinta. Tämä kasvatti kyllä ilmamäärää yli halutun, mutta laastiprismat päädyttiin kuitenkin valamaan ohjeistuksen maksimimäärän mukaisella huokostimen määrällä. Taulukossa 5.6 on esitetty jatkotutkimuksiin valittujen laastierien ainesosien määrät.

Taulukko 5.6 Laastierien ainesosien määrät, huokostimena MasterAir 71

Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Hiekka 0-4 mm [g]	Hiekka 0-6 mm [g]	Kvartsifilleri [g]	St. Astier NHL 5 [g]	Märkäkalke [g]	Vesi [g]	MasterAir 71 [p-% sideaineesta]	MasterAir 71 [g] (laimennettu 1:9)
KKh 15/85/525 + Master-Air 71	J1	1557	579	138	435	135	290	0,10	5,75
	J2	1557	579	138	435	135	285	0,10	5,75

Naudan veri

Naudan veri oli kaupasta saatavaa kotitalouskäyttöön tarkoitettua naudan verta. Verta kuivattiin uunissa 105 °C asteessa pienissä erissä noin 8 tuntia, jonka jälkeen todettiin vaa’an avulla, että verestä oli haihtunut vesi pois ja jäljelle jäänyt osuus oli pääosin proteiinia. Kuivunut veri jauhettiin morttelin avulla niin hienoksi kuin mahdollista. Jauhettu

veri vielä siivilöitiin kolmeen kertaan pienen siivilän avulla. 500 g pullosta verta saatiin kuivattua ja jauhettua tuotetta noin 90 g.

Kuivattua ja jauhettua naudan verta lisättiin aluksi laastiin 1,00 p-% sideaineen määrästä. Tällä annostuksella tuoreen laastin ilmamäärä nousi vain hieman, joten veren määrää kasvatettiin melko reiluin lisäyksin. Lopulta haluttu 10 % ilmamäärä saavutettiin tuoreessa laastissa, kun verta oli lisätty 9,42 p-% sideaineen määrästä. Veren määrä oli melko suuri, joten sen voitiin arvella vaikuttavan laastiin jo muutoinkin kuin vain huokostavana lisäaineena. Laastierästä valettiin yhteensä 6 laastiprismaa jatkokutkimuksia varten. Laastierän ainesosien määrät on esitetty taulukossa 5.7.

Koivutuhka

Koivutuhka saatiin polttamalla kuivaa koivuklapia takassa. Käytössä oli koivutuhkaa yhteensä noin 22 grammaa. Tuhka siivilöitiin kolmeen kertaan, pienen siivilän avulla, ennen kuin sitä lisättiin laastiin. Koivutuhkaa lisättiin aluksi laastiin 1,75 p-% sideaineen määrästä. Tällä annostuksella ilmamäärä ei noussut lainkaan, joten koivutuhkan määrää kasvatettiin reiluin lisäyksin. Lopulta yhteen laastierään oli lisätty kaikki käytössä ollut koivutuhka (6,72 p-% sideaineen painosta). Ilmamäärä ei silti noussut juurikaan. Tästä laastierästä valettiin 5 laastiprismaa. Laastierän ainesosien määrät on esitetty taulukossa 5.7.

Taulukko 5.7 Laastierien ainesosien määrät, historialliset lisäaineet

Lisäaine	Laastierän tunnus	Hiekka 0-4 mm [g]	Hiekka 0-6 mm [g]	Kvartsifilleri [g]	St. Astier NHL 5 [g]	Märkäkalikki [g]	Vesi [g]	Kuivattu naudan veri [p-% sideaineesta]	Kuivattu naudan veri [g]	Koivutuhka [p-% sideaineesta]	Koivutuhka [g]
Kuivattu naudan veri	L2	1557	579	138	435	135	378	9,42	53,7		
Koivutuhka	M3	1557	579	138	435	135	330			6,72	22,17

5.6.1 Tuoreen laastin ominaisuudet

Tuoreesta laastista määriteltiin heti sekoittamisen jälkeen leviämä, ilmapitoisuus, ominaispaino ja sekoitusvesimäärä. Ensimmäisenä määriteltiin tuoreen laastin ilmamäärä ja ominaispaino. Tuoreen laastin ilmamäärä määriteltiin kaikille laastierille. Vasta, kun ilmamäärä oli saatu halutulle tasolle, suoritettiin muut tuoreen laastin kokeet. Kaikista laastieristä ei siis määritelty leviämää ja sekoitusvesimäärää. Taulukossa 5.8 on esitetty jatkokutkimuksiin valittujen laastierien ominaisuudet tuoreessa laastissa.

Taulukko 5.8 Modifioidun referenssilaastin ominaisuudet tuoreessa laastissa

Lisäaine	Laasti-erän tunnus	Huokostin [p-% si-deaineesta]	Tuoreen laastin leviämä [mm]	Tuoreen laastin ilmapitoisuus [til-%]	Tuoreen laastin ominaispaino [kg/m ³]	Laastin sekoitus-vesimäärä [%]	Laastiprismojen lukumäärä [kpl]
MasterAir 102	G1	0,09	160	10,0	2008,54	14	5
	G2	0,09	155	9,5	1963,82		4
	H3	0,20	154	14,2	1903,00	14	5
	H4	0,20	157	14,7	1857,04		4
MasterAir 71	J1	0,10	164	8,6	2025,82	14	5
	J2	0,10	167	8,5	2021,63		4
Kuivattu naudan veri	L2	9,42	143	10,0	1940,07	15	6
Koivutuhka	M3	6,72	148	3,7	2151,01	15	5

5.6.2 Laastin työstettävyyys ja pumpattavuus

Laastin työstettävyyttä arvioitiin vertaamalla tuoreen laastin leviämän arvoja referenssilaastiin. Lisäksi muurauskauhatuntumaa verrattiin referenssilaastiin omien kokemusten pohjalta.

Teolliset huokostimet notkistivat laastia. Notkistavan vaikutuksen vuoksi vesimäärää voitiin pienentää. Laastierillä G ja H tuoreen laastin leviämä vastasi melko hyvin referenssilaastia. Laastierillä J leviämä oli hieman suurempi kuin referenssilaastin, joten käytettyä vesimäärää tulisi hieman pienentää. Muurauskauhatuntumalta kaikki, teollisella huokostimella huokostetut, jatkotutkimuksiin valitut laastierät vastasivat melko hyvin referenssilaastia. Laastit olivat jäykähköjä laasteja.

Historiallisista lisäaineista jauhettu naudan veri lisäsi laastin vedentarvetta. Laastista tuli myös hieman liisterimäistä. Jatkotutkimuksiin valitun laastierän L vesimäärää olisi pitänyt lisätä vielä hieman enemmän, sillä sen tuoreen laastin leviämä jäi alle referenssilaastin vastaavan. Koivutuhka ei juurikaan vaikuttanut laastin työstettävyyteen. Laastierän M vesimäärä ja leviämä jäivät hieman alle referenssilaastin vastaavia, joten myös tämän laastierän vesimäärää tulisi hieman kasvattaa.

Laastien pumpattavuutta ei todettu tässä vaiheessa tutkimusta. Laasteille tehdään ensin loput laastikokeista ja jos laasti todetaan pakkasenkestäväksi, kokeillaan pumpattavuutta sen jälkeen työmaaolosuhteissa.

5.6.3 Koeprismojen huokoisuusarvot

Kovettuneista koeprismoista määriteltiin laastin kapillaarisuutta ja huokosrakennetta kuvaavat suureet. Jokaisesta laastityypistä huokoisuusarvot pyrittiin määrittelemään kahdelle prismalle. Laastieristä L ja M huokoisuusarvot määriteltiin kuitenkin vain yksille prismoille. Tulokset kokeista on esitetty taulukossa 5.9.

Taulukko 5.9 Kovettuneen laastin kapillaarisuutta ja huokosrakennetta kuvaavat suureet

Lisäaine	Laastiprisman tunnus	Huokostin [p-% side- aineesta]	Kapillaarinen vedeni- mukeroin [kg/m ²]	Kapillaarinen vedeni- mukeroin [kg/(m ² min ^{0.5})]	Kapillaari-imeytyspi- toisuus [p-%]	Suojahuokossuhde
MasterAir 102	G1	0,09	17,69	1,19	12,69	0,28
	G2	0,09	17,57	1,22	12,76	0,27
	H3	0,20	16,68	0,84	12,75	0,36
	H4	0,20	16,48	0,95	12,61	0,39
MasterAir 71	J1	0,10	18,52	1,59	13,10	0,19
	J2	0,10	19,09	1,38	13,34	0,18
Kuivattu nau- dan veri	L2	9,42	18,44	0,96	16,75	0,14
Koivutuhka	M3	6,72	20,54	1,69	13,90	0,03

Suojahuokossuhteen perusteella voidaan olettaa, että lisähuokostus on pääosin onnistunut teollisilla huokostimilla huokostetuissa laastiprismoissa. Etenkin Masterair 102:lla huokostetut laastiprismat ylittävät reilusti pakkasenkestävyyden raja-arvona pidetyn 0,20 suojahuokossuhteen. MasterAir 71:llä huokostetut laastiprismat pääsevät hyvin lähelle suojahuokossuhteen raja-arvoa.

Historiallisista lisäaineista kuivattu naudan veri paransi hieman suojahuokossuhdetta verrattuna referenssilaastiin, mutta pakkasenkestävyyden raja-arvoa se ei ylittänyt. Sen sijaan koivutuhka ei tuottanut haluttuja suojahuokosia, päinvastoin. Koivutuhkaa sisältävän laastiprisman suojahuokossuhde jäi miltei olemattomaksi.

Suojahuokossuhteen perusteella voidaan vain arvioida pakkasenkestävyyttä, joten kaikille laastierille tehtiin jatkokokeita todellisen pakkasenkestävyyden selvittämiseksi.

5.6.4 Jäädytys-sulatuskoe

Jäädytys-sulatuskokeeseen valittiin yhteensä 13 laastiprismaa. Prismoista 9 oli huokostettu teollisella huokostimella (3+3 kpl Masterair 102, laastierät G sekä H ja 3 kpl Masterair 71, laastierä J) ja 4 prismaan oli lisätty historiallista lisäainetta (2 kpl kuivattu nautan veri, laastierä L ja 2 kpl koivutuhka, laastierä M). Vertailunäytteitä valittiin vastaavat määrät kuin pakkasrasitukseen meneviä. Ennen jäädytys-sulatuskoetta laastiprismat kylästettiin vedellä pitämällä niitä vesiupotuksessa 14 vuorokautta. Pakkasrasituksessa olleet näytteet tarkastettiin silmämäärin ja niiden painot mitattiin 10 syklin välein. Jäädytys-sulatuskoe lopetettiin kun 50 sykliä tuli täyteen, jonka jälkeen sekä rasitetut että vertailunäytteet siirrettiin tasaantumaan RH 75 % olosuhteisiin. 7 vuorokauden tasaantumisaajan jälkeen näytteistä määriteltiin lujuusarvot. Tulokset lujuuskokeista on esitetty kappaleessa 5.6.5.

Teollisella huokostimella huokostetut laastiprismat

Laastiprismojen silmämääräisessä tarkastelussa ensimmäiset havaittavat vauriot syntyivät 30 syklin jälkeen. Näytteen J2 toisessa päässä oli havaittavissa pientä pintarapautumaa, muut näytteet olivat silmämäärin kunnossa.

40 syklin jälkeen näytteen J2 pintarapautuma oli hieman laajentunut ja muissa näytteissä oli havaittavissa paikoin vain minimaalista pintarapautumaa.

50 syklin jälkeen näytteen J2 pintarapautuma oli edelleen hieman laajennut, ja se peitti prisman yhdeltä pinnalta noin 1/3 pinta-alasta. Muissa laastierän J näytteissä esiintyi pientä pintarapautumaa lähinnä näytteiden päätyjen lähellä. Laastierien G ja H laastiprismoissa oli havaittavissa vain minimaalista pintarapautumaa lähinnä prismojen alla olleen tukirutilän kohdalla. Kuva 5.6 on laastierän J prismojen alapinnalta 50 syklin jälkeen.



Kuva 5.6 Laastierän J prismat 50 syklin jälkeen, J2 prisma on kuvassa keskellä

Näytteiden painot muuttuivat kokeen aikana hyvin vähän. Laastierien G ja H näytteiden painot olivat jokaisen 10 syklin välein tehdyn punnituksen aikana $\pm 0,05$ % alkuperäisestä painosta. Laastierän J näytteissä tapahtui hieman enemmän painonmuutosta. 50 syklin

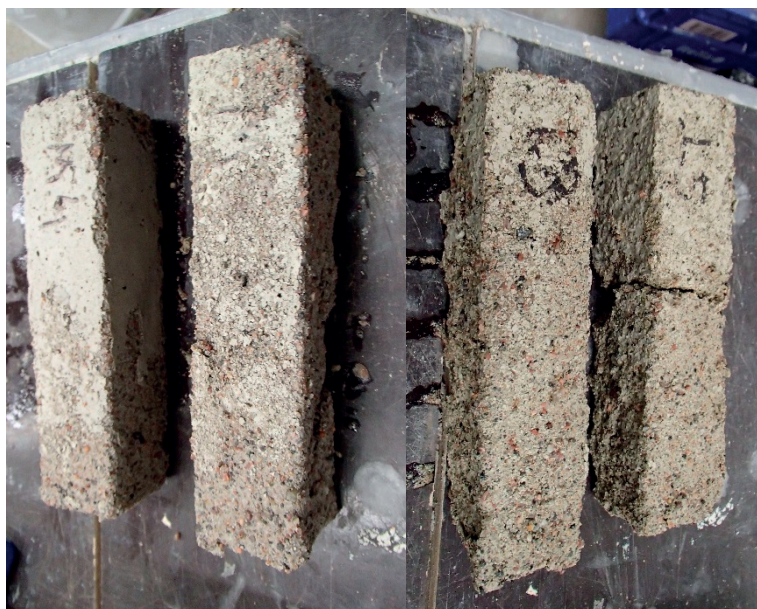
jälkeen laastierän J näytteiden painot olivat tippuneet keskimäärin 0,19 % alkuperäisestä painosta. Painonmuutokset eivät ole kuitenkaan merkittäviä ja ne tukevat silmämääräisiä havaintoja.

Pakkasrasitus lopetettiin kun 50 sykliä tuli täyteen. Pakkasrasituksen jälkeen näytteistä määritettiin lujuusarvot. Lujuuskokeiden tulokset on esitetty kappaleessa 5.6.5.

Historiallisella lisäaineella modifioidut laastiprismat

Laastierässä L, kuivatulla naudan verellä modifioidut laastiprismat, näkyi jo 10 syklin jälkeen pientä pintarapautumaa. Sen sijaan laastierässä M, jossa lisäaineena oli koivutuhkaa, ei vielä 10 syklin jälkeen ollut näkyviä vaurioita. Molempien laastierien prismojen painot olivat kasvaneet alkuperäisestä painosta 1,22–1,61 %.

20 syklin jälkeen molempien laastierien prismojen pinnoilla näkyi selkeää rapautumaa. Muutamista kohdista rapautuma oli edennyt jo silmämäärin pintakerrosta syvemmälle synnyttäen epämääräisiä kuoppia prismojen pinnalle. Laastiprismat olivat hyvin pehmeän tuntuja ja kaikki prismat katkesivat käsiteltäessä. Toinen laastierän M prismoista oli silmämäärin säilynyt hieman paremmin, mutta myös se osoittautui erittäin heikoksi ja hajosi käsiteltäessä. Laastierän L prismojen painot olivat tässä vaiheessa pienentyneet keskimäärin 10,25 % alkuperäisestä painosta ja laastierän M 0,81–10,54 %. Koska prismat olivat menettäneet lujuutensa ja hajosivat käsiteltäessä, päätettiin jäädytys-sulatuskoe keskeyttää näiden laastierien osalta 20 sykliin. Kuva 5.7 on otettu historiallisella lisäaineella huokostetuista laastiprismaista 20 syklin jälkeen.



Kuva 5.7 Historiallisella lisäaineella huokostetut laastiprismat 20 syklin jälkeen, vasemmalla laastierän M prismat ja oikealla laastierän L prismat.

Historiallisilla lisäaineilla modifioidut laastit eivät siis kestäneet pakkasrasitusta tavoiteltua 50 sykliä. Rasitetuista näytteistä ei voitu määrittää lujuusarvoja, mutta vertailunäytteistä lujuusarvot määriteltiin. Lujuuskokeiden tulokset on esitetty kappaleessa 5.6.5.

5.6.5 Koeprismojen lujuus

Koeprismojen lujuus määriteltiin yhteensä 22 koeprismalle. Teollisella huokostimella huokostetuista laastiprismoista puolet olivat olleet pakkasrasituksessa 50 sykliä ja puolet olivat vertailunäytteitä, joita oli säilytetty RH 100 % jälkihoidon jälkeen vesiupotuksessa. Historiallisella lisäaineella modifioiduista prismoista pakkasrasituksessa olleista prismoista ei voitu määrittää lujuutta, sillä ne hajosivat ennen kuin pakkasrasituksen 50 sykliä tuli täyteen, joten näistä laastieristä lujuudet määriteltiin vain vertailuprismoista. Ennen lujuuskokeita kaikki laastiprismat olivat olleet 7 vuorokautta RH 75 %, jotta koeprismojen kosteuspitoisuudet tasaantuisivat samoiksi. Kuormitushetkellä teollisella huokostimella huokostetut koeprismat olivat 73 vuorokauden ikäisiä ja historiallisella lisäaineella modifioidut koeprismat olivat 78 vuorokauden ikäisiä. Taulukossa 5.10 on esitetty tulokset lujuuskokeista.

Taulukko 5.10 Modifioidun referenssilaastin koeprismojen lujuudet

Lisäaine	Laastierän tunnus	Huokostin [p-% si-deaineesta]	Taivutuslujuus [MPa], PAKKASRASITETUT NÄYTTEET	Taivutuslujuus [MPa], VERTAILUNÄYTTEET	Taivutuslujuuksien suhde (rasitettu/vertailu)	Puristuslujuus [MPa], PAKKASRASITETUT NÄYTTEET	Puristuslujuus [MPa], VERTAILUNÄYTTEET
Masterair 102	G1	0,09	0,95	0,90	1,07	3,00	2,80
	G2	0,09	0,91	1,11	0,82	2,97	3,18
	H3	0,20	0,98	0,93	1,06	2,85	2,78
	H4	0,20	0,83	0,81	1,03	2,25	2,24
Masterair 71	J1	0,10	0,82	0,82	1,00	3,07	3,35
	J2	0,10	0,88	0,80	1,10	3,21	3,02
Kuivattu naudan veri	L2	9,42	0	0,46	0	0	1,32
Koivutuhka	M3	6,72	0	0,78	0	0	4,03

Kuormituskokeiden jälkeen selvitettiin näytteiden kosteuspitoisuudet. Kosteuspitoisuuden määrittämisen periaate on esitetty kappaleessa 5.4.8. Pakkasrasituksessa olleiden näytteiden kosteuspitoisuus oli teollisella huokostimella huokostetuilla laasteilla keskimäärin 3,3 % ja vertailunäytteiden 4,2 %. Kosteuspitoisuudet ovat hyvin lähellä samat, joten lujuudet ovat vertailukelpoisia. Historiallisilla lisäaineilla modifioitujen näytteiden kosteuspitoisuus oli vertailunäytteillä keskimäärin 4,0 %.

Taivutuslujuuksien suhteen avulla voidaan todeta laastin pakkasenkestävyys. Vaatimuksena pakkasenkestävälle laastille on, että pakkasrasitettujen näytteiden taivutuslujuus $\geq 2/3$ vertailunäytteiden taivutuslujuudesta.

Teollisella huokostimella huokostetuilla laasteilla taivutuslujuuksien suhde oli 0,82–1,10, eli kaikki laastierät voidaan todeta jäädytys-sulatuskokeen perusteella pakkasenkestäviksi.

Historiallisella lisäaineella modifioiduista laasteista ei voitu määrittää pakkasrasitettujen prismojen lujuutta, koska prismat hajosivat ennen kuin vaadittu 50 jäädytys-sulatussykliä tuli täyteen. Näinollen näitä laastierä ei voida mieltää pakkasenkestäviksi jäädytys-sulatuskokeen perusteella.

5.6.6 Huokosrakenne ohuthienäytteen perusteella

Aiempien laastikokeiden perusteella ohuthienäytteiksi valittiin laastiprismat laastieristä G ja H. Molemmissa laastierissä huokostimena käytettiin teollista huokostinta Masterair 102. Laastierässä G huokostinta oli 0,09 p-% sideaineen painosta. Laastierässä H huokostinta oli 0,20 p-% sideaineen painosta.

Ohuthietutkimusten tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä C. Ohuthietutkimusten tulokset ovat pääpiirteissään seuraavat:

Laastierä G, huokostin 0,09 p-% sideaineen painosta

- Laasti on pääosin karbonatisoitumatonta.
- Laastissa esiintyy yleisesti pieniä pallomaisia suojahuukosia, jotka edustavat pakkasenkestävyyttä antavaa lisähuokostusta. Suurin osa suojahuukosista on tehokaimmassa kokoluokassa, ja huukosjako on karkeasti arvioiden tasoa 0,20 mm. Lisäksi esiintyy harvaksen kookkaampia, epämääräisemmän muotoisia tiivistys-huukosia.
- Ilman kokonaismäärä on karkeasti arvioiden 5-10 %
- Huukostilat ovat täytteettömät.
- Näytteessä on paikoin hyvin kapeita mikrohalkeamia, jotka kulkevat runkoaines-rakeita rikkoen. Nämä ovat todennäköisimmin syntyneet näytettä katkaistaessa.

Laastierä H, huokostin 0,20 p-% sideaineen painosta

- Laasti on pääosin karbonatisoitumatonta.
- Laastissa esiintyy runsaasti pieniä pallomaisia suojahuukosia, jotka edustavat pakkasenkestävyyden antavaa lisähuokostusta. Suurin osa suojahuukosista on tehokkaassa kokoluokassa, ja huukosjako on karkeasti arvioiden tasoa 0,10 mm. Lisäksi esiintyy harvaksen kookkaampia, epämääräisemmän muotoisia tiivistys-huukosia.

- Ilman kokonaismäärä on silmämääräisen arvion perusteella 10-15 %
- Huokostilat ovat täytteettömät.
- Näytteessä on paikoin hyvin kapeita mikrohalkeamia, jotka kulkevat muutamien paikoin runkoainesrakeita rikkoen. Nämä ovat todennäköisimmin syntyneet näytettä katkaistaessa.

Ohuthietutkimusten perusteella molempia laastieriä voidaan pitää pakkasenkestävinä.

5.6.7 Kovettuneesta laastista liukenevat aineet

Kovettuneesta laastista liukenevia aineita ei todettu kokeellisin tutkimuksin. Teollisen huokostimen osalta kirjallisuuteen nojaten voidaan kuitenkin olettaa, ettei huokostimen lisääminen juuri aiheuta ylimääraisten aineiden liukenemista laastista.

Parhaiten toimiva lisäaine oli kokeellisen tutkimuksen perusteella synteettinen huokostin Masterair 102. Tuote on vesiliuos, jonka pohjana on ionittomia tensidejä. Tuote sisältää pienen määrän iholle, silmille ja ympäristölle vaarallisia aineita kuten butaanihappoa, rikkihappoa ja alkyliestereitä. Näiden vaarallisten aineiden yhteenlaskettu osuus huokostimessa on kuitenkin maksimissaankin alle 12 %. [21]

Huokostimet ovat hyvin tehokkaita tuottamaan halutut ilmakuplat laastiin, joten niiden määrät ovat yleisesti hyvin pienet. Huokostimen määrä ilmoitetaan painoprosentteina sideaineen painosta. MasterAir 102:n ohjeellinen määrä laastissa on 0,03-0,3 p-% sideaineen painosta. Esimerkiksi kokeissa käytetyssä KKh-laastissa on sideainetta noin 330 kg/m³. Laastiin lisätään huokostinta 0,09 p-% sideaineen painosta, eli laastiin tulee huokostinta noin 0,30 kg/m³. Laasti painaa noin 2000 kg/m³. Tämä tarkoittaa sitä, että laastissa on huokostinta yhteensä 0,015 p-%. Nyt kun tästä osuudesta haitalliseksi luokiteltavia aineita on 12 % päästään lopputulokseen, että huokostimen lisäyksen seurauksena laastissa haitalliseksi luokiteltavia aineita on 0,0018 p-% eli noin 0,036 kg/m³.

Huokostimen mukana laastiin menee siis hyvin pieni määrä haitallisia aineita. Vaikka nämä kaikki huokostimen mukana laastiin lisätyt aineet liukenisivat laastista ulos, puhutaan edelleen niin pienestä määrästä, ettei sillä ole merkittävää vaikutusta historiallisille rakennuksille tai ympäristölle. [22]

5.7 Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki, ominaisuuksien mittaust

Valmis kalkkilaasti oli valmistettu Hyvinkään Betoni Oy:n laastiasemalla. Hydraulisen kalkin lisäys, jälkihoito ja laastikokeet suoritettiin TTY:n rakennustekniikan laitoksen laboratoriotiloissa.

Ennen laastin valmistusta määritettiin valmiista kalkkilaastista tuoreen laastin ominaispaino ja ilmapitoisuus. Hyvinkään betonin ilmoituksen mukaan toimitettu kalkkilaasti oli tyypiltään noin K 100/2200. Hyvinkään betonin ohjeistus KKh-laastin valmistukseen oli 1 tilavuusosa hydraulista kalkkia ja 4 tilavuusosaa kalkkilaastia. Tällä suhteella valmiin laastiin tyyppi piti olla KKh 16/84/500. Kun tiedettiin kalkkilaastin ja hydraulisen kalkin tilavuuspainot, voitiin laastin valmistuksessa ainesosat punnita, jolloin päästiin tasalaatuisempaan lopputulokseen.

Laastin valmistus aloitettiin sekoittamalla kalkkilaasti porakonevispilällä. Kalkkilaastissa tapahtuu veden erottautumista, kun se seisoo astiassa. Hydraulisen kalkin ja kalkkilaastin sekoittamiseen käytettiin Hobart-sekoitinta. Kerralla pyrittiin valmistamaan noin kaksi litraa hydraulisella kalkilla vahvistettua kalkkilaastia.

Ensimmäinen laastierä pyrittiin valmistamaan Hyvinkään betonin ohjeiden mukaan. Laastierän valmistuksen jälkeisten tarkastuslaskujen yhteydessä huomattiin kuitenkin, että ensimmäinen erä ei tuottanut haluttua laastia, vaan valmistetun laastin tyyppi oli KKh 31/69/580. Lisäksi toimitettu kalkkilaasti oli laskennallisesti tyyppiä K 100/1900. Ensimmäiset laastierät valmistettiin taulukon 5.11 mukaisin ainesosin.

Taulukko 5.11 Laastierän N ainesosien määrät.

Laastityyppi	Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Kalkkilaasti K100/1900 [l]	Kalkkilaasti K100/1900 [g]	St. Astier NHL 5 [l]	St. Astier NHL 5 [g]	Vesi [g]
Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki	KKh 31/69/580	N1	1,1	1991	0,25	170	67
		N2	1,5	2820	0,30	254	70
		N3	1,5	2820	0,30	254	75

Ensimmäisen laastierän valmistuksen jälkeen pyrittiin laskennallisesti määrittämään valmiin kalkkilaastin ja hydraulisen kalkin suhde, jolla päästäisiin lähelle KKh 15/85/525 laastia. Laskujen mukaan oikeaa suhdetta ei löytynyt, vaan laastiin pitää lisätä runkoainetta. Valmiista kalkkilaastista ja hydraulisesta kalkista valmistettiin uusi laastierä, johon lisättiin myös runkoainetta. Tämän laastierän ainesosien määrät on esitetty taulukossa 5.12.

Taulukko 5.12 *Laastierän P ainesosien määrät*

Laastityyppi	Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Kalkkilaasti K100/1900 [g]	St. Astier NHL 5 [g]	Hiekka 0-4 mm [g]	Hiekka 0-6 mm [g]	Kvartsifilleri [g]	Vesi [g]
Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki	KKh 15/85/525	P1	1250,00	281,67	518,26	215,28	63,79	164
		P2	1875,47	422,5	777,39	322,92	95,68	219

5.7.1 Tuoreen laastin ominaisuudet

Tuoreesta laastista määriteltiin heti sekoittamisen jälkeen leviämä, ilmapitoisuus, ominaispaino ja sekoitusvesimäärä. Ensimmäisenä määriteltiin tuoreen laastin ilmamäärä ja ominaispaino. Tuoreen laastin ilmamäärä määriteltiin kaikille laastierille. Tuoreen laastin ilmamäärään ei pyritty enää tässä vaiheessa vaikuttamaan, sillä lisähuokostus oli tehty valmiiksi kalkkilaastiin Hyvinkään betonin laastitehtaalla. Taulukossa 5.13 on esitetty valmistettujen laastierien ominaisuudet tuoreessa laastissa.

Taulukko 5.13 *Laastierien N ja P ominaisuudet tuoreessa laastissa*

Laastityyppi	Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Tuoreen laastin leviämä [mm]	Tuoreen laastin ilmapitoisuus [til-%]	Tuoreen laastin ominaispaino [kg/m ³]	Laastin sekoitusvesimäärä [%]	Laastiprismojen lukumäärä [kpl]
Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki	KKh 31/69/580	N1	164	7,2	1953,92		
		N2	151	7,2	1966,53	18	5
		N3	152	7,2	1954,04	18	4
	KKh 15/85/525	P1	158	5,4		16	3
		P2	147	5,5	2055,03	15	6

Valmiin kalkkilaastin ilmamäärä ennen hydraulisen kalkin (ja hiekan) lisäystä oli 9,9 %. Hydraulisen kalkin lisäys siis pienensi ilmamäärää hieman. Ilmamäärä pieneni vielä entisestään, kun laastiin lisättiin runkoainetta.

5.7.2 Laastin työstettävyyys ja pumpattavuus

Laastin työstettävyyttä arvioitiin vertaamalla tuoreen laastin leviämän arvoja referenssilaaettiin. Lisäksi muurauskauhatuntumaa verrattiin referenssilaaettiin omien kokemusten pohjalta

Tuoreen laastin leviämään vaikutettiin vesimäärän kontrolloinnilla. Laastierässä N, jossa laastityyppi oli KKh 31/69/580, vesimäärä oli suurempi kuin referenssilaastillalla. Siltikin laastierän N leviämä jäi hieman alle referenssilaastin vastaavan. Laastierän N reseptin vesimäärää tulisi siis hieman kasvattaa. Laastierässä P vesimäärä ja leviämä olivat hyvin lähellä referenssilaastin vastaavia.

Valmistetut laastit olivat muurauskauhatuntumaltaan jäykähköjä laasteja. Verrattuna referenssilaaettiin laastit tuntuivat muokkaantuvan hieman paremmin. Laastien pumpattavuutta ei todettu tässä vaiheessa tutkimusta.

5.7.3 Koeprismojen huokoisuusarvot

Kovettuneista koeprismoista määriteltiin laastin kapillaarisuutta ja huokosrakennetta kuvaavat suuret. Molemmista laastieristä huokoisuusarvot määriteltiin kahdelle laastipris-malle. Tulokset kokeista on esitetty taulukossa 5.14.

Taulukko 5.14 Kovettuneen laastin kapillaarisuutta ja huokosrakennetta kuvaavat suu-reet

Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Huokostin [p-% si-deaineesta]	Kapillaarinen vede-nimukerroin [kg/m ²]	Kapillaarinen vede-nimukerroin [kg/(m ² min ^{0,5})]	Kapillaari-imeytys-pitoisuus [p-%]	Suojahuokossuhde
KKh 31/69/580	N2	0,08	21,60	1,33	17,57	0,10
	N3	0,08	21,70	1,38	17,68	0,12
KKh 15/85/525	P1	0,04	21,09	1,94	14,83	0,14
	P2	0,04	20,43	1,88	14,56	0,13

Suojahuokossuhteen perusteella voidaan arvioida, ettei laastien lisähuokostus ole täysin onnistunut. Suojahuokossuhde on vain hieman suurempi kuin referenssilaastillalla, eikä se yllä pakkasenkestävyyden suhteen raja-arvona pidettyyn 0,20:een.

Suojahuokossuhteen perusteella ei laastien pakkasenkestävyyttä voida kuitenkaan varmuudella todeta tai poissulkea, joten molemmille laastierille tehtiin jatkokokeita todellisen pakkasenkestävyyden selvittämiseksi.

5.7.4 Jäädytys-sulatuskoe

Jäädytys-sulatuskokeeseen valittiin yhteensä 6 laastiprismaa. 3 prismaa oli laastierästä N, jossa laasti oli tyypiltään KKh 31/69/580-laastia ja 3 prismaa oli laastierästä P, jossa laasti oli tyypiltään KKh 15/85/525-laastia. Vertailunäytteitä valittiin vastaavat määrät kuin pakkasrasitukseen meneviä. Ennen jäädytys-sulatuskoetta laastiprismat kyllästettiin vedellä pitämällä niitä vesiupotuksessa 14 vuorokautta. Pakkasrasituksessa olleet näytteet tarkastettiin silmämäärin ja niiden painot mitattiin 10 syklin välein. Jäädytys-sulatuskoe lopetettiin kun 50 sykliä tuli täyteen, jonka jälkeen sekä rasitetut että vertailunäytteet siirrettiin tasaantumaan RH 75 % olosuhteisiin. 7 vuorokauden tasaantumisan jälkeen näytteistä määriteltiin lujuusarvot. Tulokset lujuuskokeista on esitetty kappaleessa 5.7.5

10 syklin jälkeen laastierän N prismoissa oli jo havaittavissa selkeää rapautumaa, pisimmälle rapautuma oli edennyt näytteiden alapinnoilla. Näytteiden kulmat olivat pyöristyneet jo tässä vaiheessa. Lisäksi kaksi kolmesta laastierän N prismoista olivat katkenneet pakkasrasituksessa. Laastierän N prismojen painot olivat pienentyneet keskimäärin 6,17 % alkuperäisestä painosta. Laastierässä P ei ollut silmämäärin havaittavissa vaurioita, eivätkä niiden painot olleet juurikaan muuttuneet alkuperäisestä.

20 syklin jälkeen kaikki laastierän N prismat olivat katkenneet useaan osaan pakkasrasituksessa. Jäljellä olleet kiinteät kappaleet olivat hyvin pehmeitä ja ne oli vaikea saada yhdessä osassa ulos pakkasrasituslaitteistosta. Laastierän N prismoista ei pystytty määrittämään painoja ja niiden jäädytys-sulatuskoe päätettiin keskeyttää 20 sykliin. Kuvassa 5.8 on laastierän N prismojen jäännökset 20 syklin jälkeen. Rutilän alla näkyy hiekaksi rapautunutta laastia, joka on peräisin kuvassa olevista prismoista. Laastierän P prismojen pinnoilla oli 20 syklin jälkeen havaittavissa vain pientä pintarapautumaa, joka oli prismojen päiden tuntumassa edennyt aavistuksen pidemmälle. Prismojen painot olivat pienentyneet alkuperäisestä keskimäärin 1,24 %.



Kuva 5.8 Laastierän N laastiprismat 20 syklin jälkeen.

Laastierän P prismoille jäädytys-sulatuskoe saatiin vietyä loppuun asti, eli 50 sykliin asti. 30, 40 ja 50 syklin jälkeen tehtyjen silmämääräisten havaintojen perusteella prismojen pinnoilla pintarapautuma laajeni kiihtyvällä tahdilla kokeen edetessä. Lisäksi 30 syklistä eteenpäin prismojen kulmat alkoivat pyöristyä vähitellen. Prismojen painot myös pienentyivät alkuperäiseen verrattuna kiihtyvällä tahdilla. 50 syklin jälkeen näytteiden painot olivat pienentyneet keskimäärin 28,46 % alkuperäisestä painosta. Lisäksi 50 syklin jälkeen yksi näytteistä, tunnus P5, katkesi käsiteltäessä, muut pysyivät yhtenä kappaleena. Kuva 5.9 on otettu laastierän P prismoista 50 syklin jälkeen. Kuvasta näkyy kuinka näytteiden pinnat ovat selkeästi rapautuneet ja näytteiden kulmat ovat selkeästi pyöristyneet.



Kuva 5.9 Laastierän P prismat 50 pakkasrasitusyksen jälkeen.

5.7.5 Koeprismojen lujuus

Koeprismojen lujuus määriteltiin yhteensä 9 koeprismalle. Laastierän N prismoista pakkasrasituksessa olleista prismoista ei voitu määrittää lujuutta, sillä ne hajosivat ennen kuin pakkasrasituksen 50 sykliä tuli täyteen, joten laastierästä N lujuudet määriteltiin vain 3 vertailuprismalle. Laastierän P laastiprismoista puolet, eli 3 kpl, olivat olleet pakkasrasituksessa 50 sykliä ja puolet olivat vertailunäytteitä, joita oli säilytetty RH 100 % jälkihoidon jälkeen vesiupotuksessa. Ennen lujuuskokeita kaikki laastiprismat olivat olleet 7 vuorokautta RH 75 %, jotta koeprismojen kosteuspitoisuudet tasaantuisivat samoiksi. Kuormitushetkellä laastierän N koeprismat olivat 78 vuorokauden ikäisiä ja laastierän P koeprismat olivat 62 vuorokauden ikäisiä. Taulukossa 5.15 on esitetty tulokset lujuuskokeista.

Taulukko 5.15 Valmis kalkkilaasti, johon on sekoitettu hydraulinen kalkki, koeprismojen lujuudet

Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Huokostin [p-% sideaineesta]	Taivutuslujuus [MPa], PAKKASRASITETUT NÄYTTEET	Taivutuslujuus [MPa], VERTAILUNÄYTTEET	Taivutuslujuuksien suhde (rasitettu/vertailu)	Puristuslujuus [MPa], PAKKASRASITETUT NÄYTTEET	Puristuslujuus [MPa], VERTAILUNÄYTTEET
KKh 31/69/580	N2	0,08	0	0,30	0	0	1,21
	N3	0,08	0	0,12	0	0	1,20
KKh 15/85/525	P1	0,04	0,15	0,56	0,27	0,48	2,63
	P2	0,04	0,06	0,70	0,08	0,68	3,29

Kuormituskokeiden jälkeen näytteiden kosteuspitoisuudet selvitettiin. Kosteuspitoisuuden määrittämisen periaate on esitetty kappaleessa 5.4.8. Pakkasrasituksessa olleiden näytteiden kosteuspitoisuus oli keskimäärin 2,2 % ja vertailunäytteiden 2,5 %. Kosteuspitoisuudet ovat hyvin lähellä samat, joten lujuudet ovat vertailukelpoisia.

Taivutuslujuuksien suhteen avulla voidaan todeta laastin pakkasenkestävyys. Vaatimuksena pakkasenkestävälle laastille on, että pakkasrasitettujen näytteiden taivutuslujuus $\geq 2/3$ vertailunäytteiden taivutuslujuudesta.

Laastierän N laasteista ei voitu määrittää pakkasrasitettujen prismojen lujuutta, koska prismat hajosivat ennen kuin vaadittu 50 jäädytys-sulatussykliä tuli täyteen. Näinollen tätä laastia ei voida mieltää pakkasenkestäväksi. jäädytys-sulatuskokeen perusteella.

Laastierän P prismojen taivutuslujuuksien suhde oli 0,08-0,27, eli myöskään tätä laastia ei voida todeta jäädytys-sulatuskokeen perusteella pakkasenkestäväksi.

5.7.6 Huokosrakenne ohuthienäytteen perusteella

Näistä laastiprismoista ei teetetty ohuthieanalyysiä.

6. KOETULOSTEN VERTAILU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokeellisen tutkimuksen tarkoituksena oli löytää keino parantaa muurinkorjauslaastin pakkasenkestävyyttä heikentämättä laastin muita ominaisuuksia. Tässä kappaleessa vertaillaan koetuloksia ja tehdään johtopäätökset eri laastien toimivuudesta.

6.1 Teollisella huokostimella modifioidut laastit

Kaikkien laastikokeiden perusteella pakkasenkestävyyden suhteen toimivimmaksi laastiksi osoittautui laastierän G laasti, jossa käytettiin teollista huokostinta MasterAir 102 0,09 p-% sideaineen painosta.

Koska muurinkorjauslaasteja käytetään usein historiallisesti arvokkaissa, suojelluissa, kohteissa, haluttiin minimoida lisäaineen määrä. Laastierässä G päästiin tavoiteltuun ilmamäärään tuoreessa laastissa kaikkein pienimmällä määrällä lisäainetta.

Laastin pakkasenkestävyys perustuu laastissa oleviin oikean kokoisiin ja tasan jakautuneisiin suojahuokoskokoluokan ilmahuokosiin. Huokostimen avulla laastiin lisättiin näitä ilmahuokosia. Huokostimen avulla laastierään G tuoreeseen laastiin saatiin ilmaa yhteensä 9,8 til-%. Ilman lisäys on merkittävä, sillä referenssilaastissa ilmaa oli vain 4,0 til-%.

Ilman lisäämisen seurauksena laastin ominaispaino pieneni hieman. Samalla laastin puristuslujuus pieneni noin 45 % ja taivutuslujuus noin 15 %. Lujuuden aleneminen saattaa näyttää numeroiden valossa merkittävältä. Pitää kuitenkin muistaa, että muurinkorjauksessa käytettynä laastin lujuudella ei ole suurta merkitystä. Muurissa kantavana rakenteena toimivat toisiaan vasten olevat kivet, laastin tehtävänä on antaa muurille pitkäaikaiskestävyyttä sään vaikutuksen alaisena. Tästä syystä lujuutta enemmän tulee kiinnittää huomiota laastin pakkasenkestävyyteen.

Pakkasenkestävyys todettiin monella eri menetelmällä. Suojahuokossuhteen perusteella laastierä G voidaan arvioida pakkasenkestäväksi, suojahuokossuhde oli laastierällä G 0,27, kun taas referenssilaastilla se oli 0,10. Pakkasenkestävyyden suhteen suojahuokossuhteen raja-arvona pidetään 0,20. Suojahuokossuhde ei yksinään riitä varmistamaan laastin pakkasenkestävyyttä. Pakkasenkestävyyttä voidaan arvioida taivutuslujuuksien suhteen avulla. Idea on, että puolet laastiprismoista on ollut 50 sykliä sulatus-jäädytys kokeessa ja puolet on vertailunäytteitä, joita ei ole rasitettu. Mikäli rasitetun ja vertailunäytteiden taivutuslujuuksien suhde on yli 2/3 eli 0,67, voidaan laasti mieltää pakkasenkestäväksi. Laastierän G taivutuslujuuksien suhde oli 0,94. Referenssilaastilla taivutuslu-

juuksien suhde oli 0,27. Lisäksi myös ohuthietutkimusten mukaan laastierän G laasti todettiin pakkasenkestäväksi, kun taas referenssilaastia ei voitu todeta kauttaaltaan pakkasenkestäväksi.

Laastierän G kapillaarisuus pieneni hieman referenssilaastiin verrattuna. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että modifioitu laasti imee itseensä vähemmän vettä kapillaarisesti kuin referenssilaasti. Kun muistetaan, että valumuurissa laastin yksi isoimmista tehtävistä on estää veden pääsy muurin sisään, niin voidaan kapillaarisuuden pienentyminen mieltää hyväksi asiaksi.

Vaikka tässä kappaleessa on keskitytty vain pakkasenkestävyyden suhteen toimivimpaa laastiin, niin myös kaksi muuta teollisella huokostimella modifioitua laastia pärjasi kokeissa hyvin. Näissä molemmissa oli kuitenkin joitain seikkoja, joiden vuoksi laastierä G erottautui toimivimmaksi. Esimerkiksi laastierässä H, jossa MasterAir 102:ta oli 0,20 p-%, todettiin ohuthietutkimuksessa huokostusta olevan jopa tarpeettoman paljon. Laastierässä J, jossa MasterAir 71:tä oli 0,10 p-%, todettiin sulatus-jäädytyskokeessa silmämääräisiä vaurioita selkeämmin kuin muissa laasteissa. Lisäksi laastierän J ilmamäärä jäi hieman tavoiteltua pienemmäksi, vaikkakin se loppujenlopuksi osoittautui pakkasenkestäväksi.

6.2 Historiallisilla lisäaineilla modifioidut laastit

Historiallisina lisäaineina koitettiin kuivatun naudan veren ja koivutuhkan vaikutusta laastiin. Näiden molempien lisääminen laastiin ei tuottanut haluttua lopputulosta. Laastit eivät kestäneet sulatus-jäädytyskoetta tavoiteltuun 50 sykliin asti, joten molempien laastien pakkasenkestävyys oli huonompi kuin referenssilaastilla.

Näiden laastien muilla ominaisuuksilla ei ole merkitystä tässä tutkimuksessa, koska pakkasenkestävyys todettiin puutteelliseksi.

6.3 Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki

Laastikokeita varten tehtiin kaksi laastierää. Ensimmäisessä laastierässä seossuhteet todettiin tarkistuslaskujen jälkeen vääriksi, joten valmistettu laasti ei ollut oikeanlaista. Ensimmäinen laastierä oli siis täysin eri laasti, joten sen tuloksista ei ole hyötyä.

Toista laastierää, P, varten seossuhteet tarkistettiin ja todettiin, että valmiin kalkkilaastin ja hydraulisen kalkin lisäksi laastiin on lisättävä runkoainetta. Runkoaineen ja hydraulisen kalkin lisääminen pienensi valmiiksi lisähuokostetun kalkkilaastin ilmamäärää. Ilmamäärän pienenemisestä huolimatta tämän laastin suojahuokossuhde oli hieman parempi kuin referenssilaastilla. Suojahuokossuhde jäi kuitenkin alle raja-arvona pidetyn 0,20 alle. Jäädytys-sulatuskokeen jälkeen määriteltujen taivutuslujuuksien suhde oli 0,18, eli kokeen perusteella laasti ei ollut pakkasenkestävää.

Laastikokeissa käytetyn kalkkilaastin raejakauma ei vastannut täysin referenssilaastin vastaavaa. Lisäksi kalkkilaastin ja hydraulisen kalkin sekaan jouduttiin lisäämään runkoainetta. Runkoaineen lisäys, samoin kuin hydraulisen kalkin lisäys, pienensi laastin ilmamäärää. Huokostimen teho siis heikentyi mitä enemmän laastiin lisättiin ainesosia. Näiden vuoksi laastin pakkasenkestävyys oli huono, eikä muilla ominaisuuksilla ole merkitystä tässä tutkimuksessa.

Valmiin kalkkilaastin ja hydraulisen kalkin yhdistäminen on työteknisesti kaikkein helpoin valmistaa, etenkin työmaaolosuhteissa. Vaikka näissä laastikokeissa tätä laastia ei saatu toimimaan, niin tätä laastia olisi suositeltavaa kehittää lisää. Kalkkilaastin valmistuksessa tulee kiinnittää huomiota runkoaineen raejakautumaan, kalkkilaastin sideainerunkoainesuhteeseen ja huokostimen määrään.

7. KOETULOSTEN PERUSTEELLA OHJEET MUURINKORJAUSLAASTISTA

Laastikokeiden perusteella lisäämällä referenssilaastiin huokostinta MasterAir 102 0,09 p-% sideaineen painosta, voidaan tuottaa pakkasenkestävä laasti, joka kaikilta tutkituilta ominaisuuksiltaan soveltuu valumuurien korjaamiseen. Laastin pumpattavuutta ei testattu tässä tutkimuksessa, joten pumpattavuus pitää todeta työmaaolosuhteissa ennen korjauksiin ryhtymistä.

7.1 Koostumus

Laastin ainesosat mitataan nykyään työmaalla tilavuuksien mukaan. Olisi kuitenkin suositeltavaa alkaa punnitsemaan ainesosia, jolloin päästään tasalaatuisempaan lopputulokseen. Seuraavassa on esitetty ainesosien määrä sekä tilavuuden, että painon mukaan. Seuraavalla laastireseptillä tulee yksi tasosekoittajan erä laastia:

- Hiekka 0-4 mm	37 l	(54,5 kg)	
- Hiekka 0-6 mm	15 l	(20,3 kg)	
- Kvartsi	4,5 l	(4,8 kg)	
- NHL 5	18 l	(15,2 kg)	
- Märkäkalkki	4 l	(4,7 kg)	
- Vesi	n. 10 l	(10,0 kg)	
- MasterAir 102	0,18 l	(0,18 kg)	HUOM, laimennettu vedellä 1:9!

, jossa kvartsi = kvartsifilleri KV-NFQ 0-0,2 mm, NHL 5 = St. Astier NHL 5, märkäkalkki valmistetaan teollisesti sammutetusta kalkista, jota muhitetaan vedessä vähintään 1 kk ennen korjauslaastin tekemistä, ja hiekkojen rakeisuuskäyrät ovat liitteen B mukaiset. HUOM MasterAir 102 tulee olla laimennettu veteen suhteessa 1:9.

7.2 Sekoitushjeet

Ennen muiden ainesosien sekoittamista laimennetaan MasterAir 102 veden kanssa suhteessa 1:9.

Mitataan suurin osa laastin sekoitusvedestä (9 l) esimerkiksi ämpäriin ja lisätään sekaan laimennettu MasterAir 102 (0,18 l). Sekoitetaan kevyesti.

NHL 5 ja suurin osa hiekoista (50 l) sekä kvartsifilleri sekoitetaan keskenään.

Lisätään sekaan vesi + MasterAir seos (9 l) sekä märkäkalkki (4 l). Sekoitetaan 10 minuuttia.

Lisätään loput hiekasta ja jatketaan sekoittamista 10 min.

Laastin koostumus säädetään sopivaksi tarvittaessa pienellä vesilisäyksellä. Lopullisen koostumuksen määräävät työn suorittajan mieltymykset sekä työtekniikka.

8. LISÄTUTKIMUSTARVE

Laastin pumpattavuus

Koetulosten perusteella suositellun laastin pumpattavuutta ei tutkittu tämän tutkimuksen yhteydessä. Ennen töihin ryhtymistä laastin pumpattavuus tulisi todeta työmaaolosuhteissa.

Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki

Tässä tutkimuksessa valmiin kalkkilaastin ja hydraulisen kalkin yhdistämisessä oli ongelmia. Näin laastin valmistaminen olisi kuitenkin työteknisesti huomattavasti helpompaa kuin kaikkien ainesosien mittaaminen ja sekoittaminen erikseen. Valmiin kalkkilaastin ja hydraulisen kalkin yhdistämisessä havaittiin lisätutkimustarve. Huomiota tulisi kiinnittää erityisesti kalkkilaastin valmistuksessa käytetyn runkoaineen raejakautumaan, kalkkilaastin sideaine- runkoainesuhteeseen ja kalkkilaastin lisähuokostamiseen.

Historialliset lisäaineet

Historiallisista lisäaineista lisätutkimuksia kannattaisi tehdä lipeän vaikutuksesta laastiin. Lipeää voidaan valmistaa koivutuhkasta suhteellisen yksinkertaisin menetelmin. Tässä tutkimuksessa koivutuhka lisättiin sellaisenaan laastin sekaan, jolloin se ei toiminut huokostimen tavoin. Kirjallisuudesta löytyy viitteitä, että koivutuhkan maine huokoistavana aineena voi liittyä lipeään.

LÄHTEET

- [1] Metsäranta P, Nordman J., Olavinlinnan muurinkorjauksessa siirrytään hydrauliseen kalkkilaastiin, Museoviraston rakennushistorian osaston aikakausikirja 3, 2010, s.54–65
- [2] Kotkas Eero, Luonnonkivimuurien mitoitus – Rakennus- ja korjaustekniikka, Ikuinen raunio – seminaari, 2008, 21 s.
- [3] Dührkop H., Saretok V., Sneck T., Svendsen V., Laasti, Muuraus, Rappaus, Rakentajain kustannus Oy, Helsinki 1966, 428 s.
- [4] von Konow T, Laastit vanhoissa rakenteissa, Suomenlinnan hoitokunta, 2006, 104 s.
- [5] Perander Thorborg... et al., Historiallisten kivrakenteiden laastit, Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1985, 148 s.
- [6] BY 46, Rappauskirja 2005, Suomen betoniyhdistys r.y., 2005, 158 s.
- [7] Valumuurien korjausohje 1995, Museovirasto, Rakennushistorian osasto, 1995
- [8] Bayer R. & Lutz H. Article: Dry mortar's from Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Electronic release, Wiley-VCH. Weinheim 2003.
- [9] Internet: http://www.worktopfactoryy.co.uk/ResourceCentre/Encyclopedia-OfStoneWorktops/Calcium_Oxide/tabid/1716/Default.aspx
- [10] von Konow T, Olavinlinnan korjauslaastit ja työohjeet, TUREIDA, Olavinlinnan työmaa-asiakirjat 2009
- [11] Leppäniemi A, Olavinlinna ja Suomenlinna, Valumuurien laastisaumojen tutkimukset, Yhteenvetoraportti, Ins.tsto Lauri Mehto Oy, 2015
- [12] Nordman Flink... et al., Olavinlinnan muurinkorjaus ja tiiliosien konservointi 2013-2016, Työselitys, Museovirasto, Kulttuuriympäristön hoito, Restaurointi, 2014, 7 s
- [13] Leppäniemi A, Valumuurien laastisaumojen tutkimukset, Yhteenvetoraportti 2 (Turun linna), Ins.tsto Lauri Mehto Oy, 2015
- [14] Leppäniemi, Sonninen, Turun linna, Julkisivujen ja muurien kuntotutkimusraportti, 2014
- [15] Mattinen M., Valtion rakennusperinnön vaaliminen, Museovirasto, 1997, 90 s.

- [16] Ylikoski K., Fillerimateriaalin vaikutuksista laastin ominaisuuksiin, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Diplomityö, 1985, 66 s.
- [17] Harini M., Shaalini G., Dhinakaran G., Effect of size and type of fine aggregates on flowability of mortar, KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 6 s.
- [18] Hu J., Wang K., Effect of size and uncompacted voids of aggregate on mortar flow ability, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 5, 2007, 11 s.
- [19] Jasiczak J., Zielinski K., Effect of protein additive on properties of mortar, Cement & Concrete Composites 28, 2006, 7 s.
- [20] Internet: <http://www.hs.fi/muistot/a1364358091486>, luettu 23.6.2016
- [21] Käyttöturvallisuustiedote, Masterair 102, Semtu Oy, 2015, 6 s.
- [22] Concrete Admixtures and the Enviroment, Deutsche Bauchemie e.V., 2011, 56 s.
- [23] Talvimuurausohjeet, Wienerberger Oy Ab, 2004, 8s.

LIITE A:

Olavinlinnan laastireseptit

Olavinlinna PUMPPAUSLAASTI vaihtoehto I

KKh 15/85/525

suurin raekoko 6 mm

Mitat: tilavuusosina	litraa noin	65	25
----------------------	-------------	----	----

Sideaineet	Märkäkalkki (tahna)	5	2
	St. Astier NHL 5	22	9

Hiekat	Kuhasalmen 1	65	26
	Karkea hiekka 4 - 6 mm	4	1,5

Hiekat: Kuhasalmen hiekka 1 maks raekoko 4 mm**Karkeaa hiekkaa seulottu 4 - 6 mm****Sekoitusohjeet:**

NHL 5, karkea hiekka ja osa hiekasta (50 litr/ 20 litr) sekoitetaan.

Lisätään n. 10 litraa (n. 4 litr) vettä ja märkäkalkki. Massa on tässä vaiheessa löysähkö. Sekoitetaan 10 min.

Lisätään loput hiekasta (15 litr / 6 litr) ja jatketaan sekoittamista 10 min.

Laastin koostumus säädetään tarvittaessa pienellä vesilisäyksellä
(1 - 2 litraa) (0,4-0,8 litraa)

Pumppauslaasti sopivan notkea, ei liian löysää!

Sekoitusaika: 10 min + 10 min

Käyttöaika: n. 4 h

Esikastelua ei tarvita luonnonkivimuurien pumppauksessa.

Luonnonkivimuuri ei saa olla märkä pumppausvaiheessa!!

Jälkikastelu vedellä (esim. vesisumutuksella) vähintään 3 päivää.

Olavinlinna

TIILIHOLVIEN MUURAUS JA SAUMAUSLAASTI

KKh 20/80/610

suurin raekoko 4 mm

Mitat: tilavuusosina

litraa noin

45

Sideaineet

Märkäkalke (tahna)

4

St. Astier NHL 5

10

Hiekat

Kuhasalmen 1

40

hiekkä: Kuhasalmen hiekkä maks raekoko 4 mm

Sekoitusohjeet:

NHL 5 ja osa hiekasta (40 litr) sekoitetaan.

Lisätään n. 8 litraa vettä ja märkäkalkki. Massa on tässä

vaiheessa löysähkö. Sekoitetaan 10 min.

Lisätään loput hiekasta (10 litr) ja jatketaan sekoittamista 10 min.

Laastin koostumus säädetään tarvittaessa pienellä vesilisäyksellä

Saumauslaasti kuivahko, mutta hyvin työstettävä

Sekoitusaika: 10 min + 10 min

Käyttöaika: n. 4 h

Esikastelua runsaasti ed. päivänä ja vielä ennen saumaustyötä.

Tiilipinnat tulee olla mattakosteat saumausvaiheessa.

Jälkikastelu vedellä (esim. vesisumutuksella) vähintään 3 päivää.

Olavinlinna

Injektointilaasti hyvin kapeille saumoille

KKh 40/60/450

suurin raekoko 0,2 mm

Mitat: tilavuusosina

litraa noin

3

Sideaineet

Märkäkalkki (tahna)

1

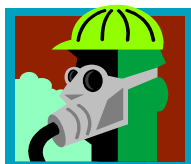
St. Astier NHL 5

1

Hiekat

kvartsifilleri *)

5



KÄYTÄ PÖLYSUOJAINTA KV-FILLERIN KANSSA

***) Kvartsifilleri, KV-NFO 0 - 0,2 mm**

Sekoitusohjeet:

Sekoita kaikki aineet hyvin. Lisää vettä ja jatka sekoittamista noin 10 min.

Injektointilaasti tulee olla sopivan juoksevaa, mutta ei liian vetistä

Käyttöaika: n. 2 h

Hyvin kapeat saumat injektoidaan tällä laastilla. Laastin valkoisuus häivytetään painamalla kosteaan pintaan seulottua hienoa hiekkaa.

Esikastelua ei tarvita luonnonkivimuurien saumauksessa.

Jälkikastelu vedellä (esim. vesisumutuksella) vähintään 1 päivä.

LIITE B:

Olavinlinnan hiekkojen rakeisuuskäyrät

ANALYSETTE 22 MicroTec plus

? Kumpu 1 kasasta laser+seula

Meas.Nr. 6800 **Date** torstai, 17 syyskuu 2015 12:15

Material Kumpu 1 kasasta laser+seula

57725-03

Add. info

Calculation Fraunhofer

TradeOff very_narrow (0,0)

Refractive Index 0

Absorption Index 0

Scans Fine

Scans Coarse

Channels 0

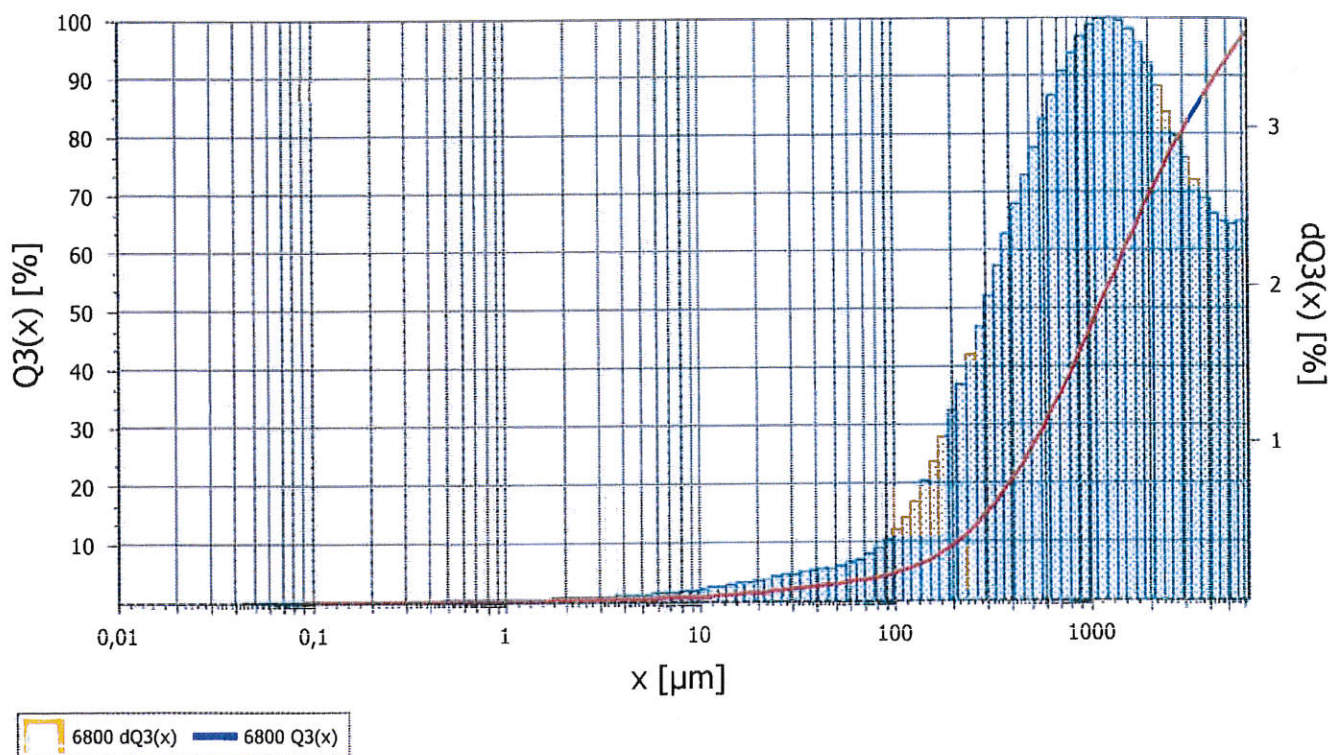
Beam Obscuration

Meas. Range

-

Pump

Ultrasonics



Mode 1 260,47 µm

Span (d90-d10)/d50 3,78

D[4,3] 1610,5 µm

FreqCum	Size
0,1	1
0,4	4
1,2	16
2,1	32
3,3	63
4,3	90
5,7	125
12,2	250
25,9	500
46,4	1 000
69,2	2 000
87,7	4 000
96,6	6 000

FreqCum	Size
10	210,3
50	1 115,9
90	4 425,5

Hiekka 0-4 mm

ANALYSETTE 22 MicroTec plus

M 5671 KTK laser+seula

Meas.Nr. 5671

Date tiistai, 22 lokakuu 2013 02:10

Material KTK laser+seula

56903-03

Add. info

Calculation Fraunhofer

TradeOff very_narrow (0,0)

Refractive Index 0

Absorption Index 0

Scans Fine

Scans Coarse

Channels 0

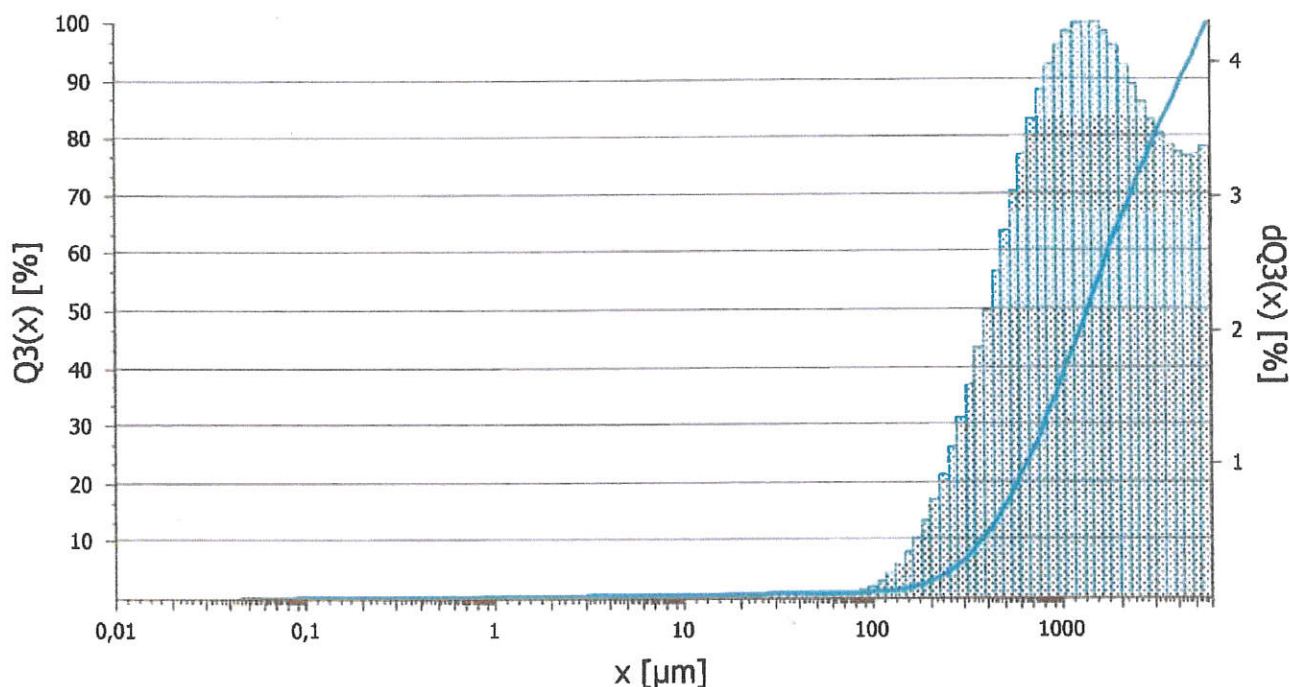
Beam Obscuration

Meas. Range

-

Pump

Ultrasonics



5671 dQ3(x) — 5671 Q3(x)

Mode 1 396,18 µm

Span (d90-d10)/d50 2,86

D[4,3] 1869,6 µm

Size	Freq
1	0,1
4	0,2
16	0,4
32	0,5
63	0,7
90	0,8
125	1,1
250	4,3
500	15,5
1 000	37,6
2 000	64,5
4 000	87,6
6 000	100

Freq	Size
10	385,8
50	1 376,8
90	4 318,9

Hiekka 0-6 mm

LIITE C:

Ohuthietutkimusten tulokset

Tekninen vastuuhenkilö:



Arto Koskiahde, FM / tj.

Tilaaaja: Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy Abraham Wetterin tie 4 00880 HELSINKI	Tilaus/ pvm.: Joonas Lehtonen 10.06.2016 Näytteiden saap.pvm.: 15.06.2016
Kohde: Diplomityö, Valumuurien korjauslaastit	
Tehtävä: Mikrorakennetutkimus ohuthieestä, 3 kpl; testaus 21.07.2016	

NÄYTTEET

Tilaaajan toimittamina ja merkitseminä 3 kpl prismanäytteitä, jotka olivat käyneet läpi taivutuslujuustestauksen. Tunnukset olivat B5, G9 ja H9. Näytteet arvioitiin suunniteltuun testaukseen soveltuviksi.

Taustatiedoksi saatiin: "Laasti on tyyppiltään hydraulisella kalkilla vahvistettua kalkkilaastia (KKh 15/85/525). Laasteihin G ja H on lisätty huokostinta".

TUTKIMUKSET


Näytteistä valmistettiin Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy:n Sotkamon laboratoriossa esi-impregnoitien jälkeen noin 0,025 mm paksut ohuthienäytteet 53 mm (pituus) x 32 mm (leveys) kokoisille näytelaseille. Ohuthieet tutkittiin polarisaatiomikroskoopilla Vantaan toimipisteessä. Tutkimuksissa noudatettiin standardia *ASTM C 856-14* soveltuvin osin.

Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy:llä on FINAS-akkreditointi ohuthietutkimuksille (akkreditoitu testauslaboratorio T208, *SFS-EN ISO/IEC 17025*).

TULOKSET

Tutkimustulokset koskevat tähän toimeksiantoon sisältyneitä ohuthienäytteitä.

Tekninen vastuuhenkilö:


Arto Koskiahde, FM / tj.**OHUTHIETUTKIMUKSET****Näyte B5, referenssilaasti**

Näytteen koko ohuthieessä on 53 mm x 32 mm.

- Laastissa esiintyy paikoittain osittaiskarbonatisoitumista, eli karbonatisoitumisaste on hyvin alhaista tasoa.
- Laastissa esiintyy suhteellisen harvaksen pieniä pallomaisia suojahuokoskokoluokan (0,02-0,80 mm) ilmahuokosia, jotka voivat antaa jonkinasteista pakkasenkestävyyttä. Lisäksi esiintyy yleisemmin kookkaampia, epämääräisemmän muotoisia tiivistyshuokosia (Ø 0,8-3,5 mm). Ilman määrä on silmämääräisen arvion perusteella luokkaa 3-5 %.
- Huokostilojen seinämissä on muutamia paikoin ohuehkoja portlandiittikiteytymiä (ilmeisimmin seurauksena määritettyä säilytysolosuhteista).
- Vesi-sideainesuhteessa esiintyy pienipiirteistä vaihtelua.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyörityneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/hiekkaa. Pääkivilajeina ovat graniitti ja gneissi. Suurin raekoko ohuthienäytteessä on # 3,5 mm. Sideaine-runkoainekontaktit ovat enimmäkseen ehjiä.
- Sideainepastassa on muutamia paikoin lähes tiiviitä mikrosäröjä (pituudet <1 mm), jotka ovat voineet syntyä lujuustestauksen yhteydessä.

Näyte G9, modifioitu referenssilaasti, huokostin 0,09 %

Näytteen koko ohuthieessä on 53 mm x 32 mm.

- Laasti on pääosin karbonatisoitumatonta.
- Laastissa esiintyy yleisesti pieniä pallomaisia suojahuokosia (Ø 0,02-0,80 mm), jotka edustavat pakkasenkestävyyttä antavaa lisähuokostusta. Suurin osa suojahuukosista on tehokkaimmassa Ø <0,30 mm:n kokoluokassa, ja huokosjako on karkeasti arvioiden tasoa 0,20 mm. Lisäksi esiintyy harvaksen kookkaampia, epämääräisemmän muotoisia tiivistyshuokosia (Ø 0,8-10,0 mm). Ilman kokonaismäärä on karkeasti arvioiden luokkaa 5-10 %.
- Huokostilat ovat täytteettömiä.
- Vesi-sideainesuhteessa esiintyy pienipiirteistä vaihtelua.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyörityneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/hiekkaa. Pääkivilajeina ovat graniitti ja gneissi. Suurin raekoko ohuthienäytteessä on # 3,0 mm. Sideaine-runkoainekontaktit ovat enimmäkseen ehjiä.
- Näytteessä on paikoin hyvin kapeita (<0,01 mm) mikrohalkeamia (pituudet 1-3 mm), jotka kulkevat runkoainerakeita rikkoen. Nämä ovat todennäköisimmin syntyneet lujuustestauksen yhteydessä.

Näyte H9, modifioitu referenssilaasti, huokostin 0,20 %

Näytteen koko ohuthieessä on 53 mm x 32 mm.

- Laasti on pääosin karbonatisoitumatonta.
- Laastissa esiintyy runsaasti pieniä pallomaisia suojahuukosia (Ø 0,02-0,80 mm), jotka

Tekninen vastuhenkilö:



Arto Koskiahde, FM / tj.

edustavat pakkasenkestävyyden antavaa lisähuokostusta. Suurin osa suojahuokosista on tehokkaassa $\varnothing < 0,30$ mm:n kokoluokassa, ja huokosjako on karkeasti arvioiden jopa tasoa 0,10 mm. Lisäksi esiintyy harvaksen kookkaampia, epämääräisemmän muotoisia tiivistys-huokosia ($\varnothing 0,8-5,0$ mm). Ilman kokonaismäärä on silmämääräisen arvion perusteella luokkaa 10-15 %.

- Huokostilat ovat täytteettömiä.
- Vesi-sideainesuhteessa esiintyy pienipiirteistä vaihtelua.
- Runkoaine on särmikkäistä ja särmiltään pyöristyneistä rakeista koostuvaa luonnonsoraa/-hiekkaa. Pääkilajeina ovat graniitti ja gneissi. Suurin raekoko ohuthieessä on # 3,5 mm. Sideaine-runkoainekontakteissa esiintyy paikoin kapeita ja lyhyitä mikrohalkeamia (todennäköisimmin lujoudestaukseen liittyviä).
- Näytteessä on paikoin hyvin kapeita (0,01 mm) mikrohalkeamia (pituudet 1-3 mm), jotka kulkevat muutamien paikoin myös runkoainerakeita rikkoen. Mikrohalkeamat ovat todennäköisimmin seurausta lujoudestauksesta.

LIITE D:

Laastikokeiden tulokset

Laastityyppi	Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Huokostin [p-% sideaineesta]	Tuoreen laastin leviäjä, iskupöydällä 15 iskua [mm]	Tuoreen laastin ilmapitoisuus [til-%]	Tuoreen laastin ominaispaino [kg/m ³]	Laastin sekoitusvesimäärä [%]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/m ²]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/(m ² min ^{0.5})]	Kapillaari-imeytyspitoisuus [p-%]	Suojahuokossuhde	Taivutuslujuus [MPa], PAKKASRASITETUT NÄYTTEET	Taivutuslujuus [MPa], VERTAILUNÄYTTEET	Taivutuslujuuksien suhde (rasitettu/vertailu)	Puristuslujuus [MPa], PAKKASRASITETUT NÄYTTEET	Puristuslujuus [MPa], VERTAILUNÄYTTEET	Näytteiden ikä kuormitushetkellä [d]
Referenssilaasti	KKh 15/85/525	B		155	4,0	2099,87	16	20,12	1,23	13,45	0,10	0,32	1,18	0,27	1,00	5,43	92
Teollisella huokostimella modifioitu referenssilaasti	KKh 15/85/525 + MasterAir 102	G	0,09	158	9,8	1986,18	14	17,63	1,21	12,73	0,27	0,93	1,00	0,94	2,99	2,99	73
		H	0,20	156	14,5	1880,02	14	16,58	0,89	12,68	0,38	0,91	0,87	1,05	2,55	2,51	73
Historiallisella lisäaineella modifioitu referenssilaasti	KKh 15/85/525 + MasterAir 71	J	0,10	166	8,6	2023,73	14	18,80	1,49	13,22	0,19	0,85	0,81	1,05	3,14	3,18	73
	KKh 15/85/525 + kuivattu naudan veri	L	9,42	143	10,0	1940,07	17	18,44	0,96	16,75	0,14	0	0,46	0	0	1,32	78
Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki	KKh 15/85/525 + koivutuhka	M	6,72	148	3,7	2151,01	15	20,54	1,69	13,90	0,03	0	0,78	0	0	4,03	78
	KKh 31/69/580	N	0,08	152	7,2	1960,29	18	21,65	1,35	17,63	0,11	0	0,21	0	0	1,20	78
	KKh 15/85/525	P	0,04	153	5,5	2055,03	16	20,76	1,91	14,70	0,14	0,11	0,63	0,18	0,58	2,96	62

Laastityyppi	Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Valmistusalku, pvm, klo	Hiekka 0-4 mm [l]	Hiekka 0-6 mm [l]	Kvartsifilleri [l]	St. Astier NHL 5 [l]	Märkäkalikki [l]	Vesi [l]	Tuoreen laastin leviäjä, skuppydalla 15 iskua [mm]	Tuoreen laastin ilmapiitoisuus [tl-%]	Tuoreen laastin ominaispaine [kg/m ³]	Laastin sekoitusvesimäärä [%]	Laastiprismojen lukumäärä [kpl]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/m ²]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/(m ² ·min ^{0,5})]	Kapillaari-imeytyspitoisuus [p-%]	Suojahuokossuhde	Taivutuslujuus [Mpa], PAKKASRASTETUT NÄYTTEET	Taivutuslujuus [Mpa], VERTAILUNÄYTTEET	Taivutuslujuuksien suhde (rastettu/vertailu)	Puristuslujuus [Mpa], PAKKASRASTETUT NÄYTTEET	Puristuslujuus [Mpa], VERTAILUNÄYTTEET	Näytteiden ikä kuormitushetkellä [d]
Referenssi-laasti	KKh 15/85/525	A	26.11.2015 10:00	37	15	4,5	18	4	10-13	150	3,4	2125,15	15											
		B	26.11.2015 12:00	37	15	4,5	18	4	10-13	155	4,0	2099,87	16	12	20,12	1,23	13,45	0,10	0,32	1,18	0,27	1,00	5,43	92,00

Laastityyppi	Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Valmistusalku, pvm, klo	Hiekka 0-4 mm [g]	Hiekka 0-6 mm [g]	Kvartsifilleri [g]	St. Astier NHL 5 [g]	Märkäkalikki [g]	Vesi [g]	Huokostin MasterAir 102 [p-% sideaineesta]	Huokostin MasterAir 102 [g] (laimennettu 1:9)	Huokostin MasterAir 71 [p-% sideaineesta]	Huokostin MasterAir 71 [g] (laimennettu 1:9)	Tuoreen laastin leviäjä, iskupydällä 15 iskua [mm]	Tuoreen laastin ilmapiitoisuus [tl-%]	Tuoreen laastin ominaispaino [kg/m ³]	Laastin sekoitusvesimäärä [%]	Laastiprismojen lukumäärä [kpl]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/m ²]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/(m ² min ^{0,5})]	Kapillaari-imeytyspitoisuus [p-%]	Suojahuokossuhde	Taivutuslujuus [Mpa], PAKKASRASTETUT NÄYTTEET	Taivutuslujuus [Mpa], VERTAILUNÄYTTEET	Taivutuslujuuksien suhde (rastettu/vertailu)	Puristuslujuus [Mpa], PAKKASRASTETUT NÄYTTEET	Puristuslujuus [Mpa], VERTAILUNÄYTTEET	Näytteiden ikä kuormitushetkellä [d]		
0-sarja	KKh 15/85/525	C1	8.2.2016 10:00	1557	579	138	435	135	341					151	3,5	2113,34	15													
Teollisella huokostimella modifioitu referenssi-laasti	KKh 15/85/525 + MasterAir 102	D1	8.2.2016 13:20	1557	579	138	435	135	307	0,01	0,64			153	4,0	2135,16														
		D2	8.2.2016 13:45	1557	579	138	435	135	307	0,03	1,71			145	5,9	2100,00														
		D3	8.2.2016 14:15	1557	579	138	435	135	307	0,05	2,89				7,2	2066,06														
		D4	8.2.2016 14:40	1557	579	138	435	135	307	0,07	4,04				8,7	2015,22														
		E1	8.2.2016 15:00	1557	579	138	435	135	302	0,09	5,32			171	11,1	1960,25	16													
		F1	9.2.2016 08:30	1557	579	138	435	135	285	0,08	4,62			147	7,7	2078,00														
		F2	9.2.2016 09:00	1557	579	138	435	135	285	0,09	5,09				7,7	2070,00														
		G1	9.2.2016 09:30	1557	579	138	435	135	290	0,09	5,13			160	10,0	2008,54	14	5	17,69	1,19	12,69	0,28	0,95	0,90	1,07	3,00	2,80	73		
		G2	9.2.2016 10:30	1557	579	138	435	135	290	0,09	5,13			155	9,5	1963,82		4	17,57	1,22	12,76	0,27	0,91	1,11	0,82	2,97	3,18	73		
		H1	9.2.2016 11:10	1557	579	138	435	135	280	0,12	6,84				11,0	1988,26														
		H2	9.2.2016 11:35	1557	579	138	435	135	280	0,15	8,62				12,5	1929,90														
		H3	9.2.2016 11:50	1557	579	138	435	135	280	0,20	11,49			154	14,2	1903,00	14	5	16,68	0,84	12,75	0,36	0,98	0,93	1,06	2,85	2,78	73		
		H4	9.2.2016 12:10	1557	579	138	435	135	280	0,20	11,49			157	14,7	1857,04		4	16,48	0,95	12,61	0,39	0,83	0,81	1,03	2,25	2,24	73		
	KKh 15/85/525 + MasterAir 71	I1	9.2.2016 12:50	1557	579	138	435	135	290			0,09	5,14		8,5	2043,43														
		I2	9.2.2016 13:00	1557	579	138	435	135	290			0,10	5,70		8,0	2060,57														
		I3	9.2.2016 13:15	1557	579	138	435	135	285			0,11	6,30		8,5	2047,57														
		I4	9.2.2016 13:40	1557	579	138	435	135	285			0,15	8,55		9,2	2009,79														
		I5	9.2.2016 14:00	1557	579	138	435	135	285			0,17	9,69		8,6	2028,04														
		I6	9.2.2016 14:15	1557	579	138	435	135	285			1,00	57,00		24,0	1621,04														
		J1	9.2.2016 14:40	1557	579	138	435	135	290			0,10	5,75	164	8,6	2025,82	14	5	18,52	1,59	13,10	0,19	0,82	0,82	1,00	3,07	3,35	73		
		J2	9.2.2016 15:00	1557	579	138	435	135	285			0,10	5,75	167	8,5	2021,63		4	19,09	1,38	13,34	0,18	0,88	0,80	1,10	3,21	3,02	73		

Laastityyppi	Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Valmistusaika, pvm, klo	Hiekka 0-4 mm [g]	Hiekka 0-6 mm [g]	Kvartsifilleri [g]	St. Astier NHL 5 [g]	Märkäkalkei [g]	Vesi [g]	Huokostin kuivattu naudan veri [p-% sideaineesta]	Huokostin kuivattu naudan veri [g]	Huokostin kuivutuhkia [p-% sideaineesta]	Huokostin kuivutuhkia [g]	Tuoreen laastin leviämä, iskupöydällä 15 iskua [mm]	Tuoreen laastin ilmapitoisuus [ti-%]	Tuoreen laastin ominaispaino [kg/m ³]	Laastin sekoitusvesimäärä [%]	Laastiprismojen lukumäärä [kpl]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/m ²]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/(m ² ·min ^{0,5})]	Kapillaari-imeytyspitoisuus [p-%]	Suojahuokossuhde	Taivutuslujuus [Mpa], PAKKASRÄSTETUT NÄYTTEET	Taivutuslujuus [Mpa], VERTAILUNÄYTTEET	Taivutuslujuuksien suhde (rästetty/vertailu)	Puristuslujuus [Mpa], PAKKASRÄSTETUT NÄYTTEET	Puristuslujuus [Mpa], VERTAILUNÄYTTEET	Näytteiden ikä kuormitushetkellä [d]		
Historiallilla lisäaineella modifioitu referenssi-laasti	KKh 15/85/525 + kuivattu naudan veri	K1	8.3.2016 9:00	1557	579	138	435	135	290	1,00	5,7				4,3	2119,18														
		K2	8.3.2016 9:15	1557	579	138	435	135	295	2,75	15,7				5,0	2088,95														
		K3	8.3.2016 9:30	1557	579	138	435	135	325	4,54	25,9				6,0	2075,50														
		K4	8.3.2016 9:45	1557	579	138	435	135	335	6,40	36,5			124	6,9	2009,73														
		L1	8.3.2016 10:00	1557	579	138	435	135	360	7,02	40				7,8	1960,75														
		L2	8.3.2016 10:30	1557	579	138	435	135	378	9,42	53,7				143	10,0	1940,07	17	6	18,44	0,96	16,75	0,14	0	0,46	0	0	1,32	78	
	KKh 15/85/525 + kuivutuhkia	M1	8.3.2016 12:00	1557	579	138	435	135	310			1,75	5,44		3,3	2113,47														
		M2	8.3.2016 12:30	1557	579	138	435	135	310			3,22	9,98		3,7	2136,14														
		M3	8.3.2016 13:00	1557	579	138	435	135	330			6,72	22,17	148	3,7	2151,01	15	5	20,54	1,69	13,90	0,03	0	0,78	0	0	4,03	78		

Laestyyppi	Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Valmistusaika, pvm, klo	Kalkkilaasti K100/1900 [l]	Kalkkilaasti K100/1900 [g]	St. Astier NHL 5 [l]	St. Astier NHL 5 [g]	Vesi [g]	Tuoreen laastin leviämä, iskupöydällä 15 iskua [mm]	Tuoreen laastin ilmapitoisuus [ti-%]	Tuoreen laastin ominaispaino [kg/m ³]	Laastin sekoitusvesimäärä [%]	Laastiprismojen lukumäärä [kpl]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/m ²]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/(m ² ·min ^{0,5})]	Kapillaari-imeytyspitoisuus [p-%]	Suojahuokossuhde	Taivutuslujuus [Mpa], PAKKASRÄSTETUT NÄYTEET	Taivutuslujuus [Mpa], VERTAILUNÄYTEET	Taivutuslujuuksien suhde (rästetty/vertailu)	Puristuslujuus [Mpa], PAKKASRÄSTETUT NÄYTEET	Puristuslujuus [Mpa], VERTAILUNÄYTEET	Näytteiden ikä kuormitushetkellä [d]
Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki	KKh 31/69/580	N1	8.3.2016 13:40	1,1	1991	0,25	170	67	164	7,2	1953,92												
		N2	8.3.2016 13:45	1,5	2820	0,30	254	70	151	7,2	1966,53	18	5	21,60	1,33	17,57	0,10	0	0,30	0	0	1,21	78
		N3	8.3.2016 14:15	1,5	2820	0,30	254	75	152	7,2	1954,04	18	4	21,70	1,38	17,68	0,12	0	0,12	0	0	1,20	78

Laestityyppi	Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Valmistusaika, pvm	Tuoreen laastin ilmapitoisuus [t-l-%]	Tuoreen laastin ominaispaino [kg/m ³]
Valmis kalkkilaasti	K 100/1900	O	26.2.2016	9,9	1875,49

Laestityyppi	Laastin seossuhde	Laastierän tunnus	Valmistusaika, pvm, klo	Kalkkilaasti K100/1900 [l]	Kalkkilaasti K100/1900 [g]	St. Astier NHL 5 [l]	St. Astier NHL 5 [g]	Hiekka 0-4 mm [g]	Hiekka 0-6 mm [g]	Kvartsifilleri [g]	Vesi [g]	Tuoreen laastin leviämä, iskupöydällä 15 iskua [mm]	Tuoreen laastin ilmapitoisuus [t-l-%]	Tuoreen laastin ominaispaino [kg/m ³]	Laastin sekoitusvesimäärä [%]	Laastiprismojen lukumäärä [kpl]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/m ²]	Kapillaarinen vedenimukerroin [kg/(m ² ·min ^{0,5})]	Kapillaari-meeyspitoisuus [p-%]	Suojahuokossuhde	Taivutuslujuus [Mpa], PAKKASRÄSTETUT NÄYTEET	Taivutuslujuus [Mpa], VERTAILUNÄYTEET	Taivutuslujuuksien suhde (rästetty/vertailu)	Puristuslujuus [Mpa], PAKKASRÄSTETUT NÄYTEET	Puristuslujuus [Mpa], VERTAILUNÄYTEET	Näytteiden ikä kuormitushetkellä [d]
Valmis kalkkilaasti + hydraulinen kalkki	KKh 15/85/525	P1	24.3.2016 14:30	0,7	1250	0,33	281,67	518,26	215,28	63,79	164	158	5,4		16	3	21,09	1,94	14,83	0,14	0,15	0,56	0,27	0,48	2,63	62
		P2	24.3.2016 15:00	1,0	1875,47	0,50	422,5	777,39	322,92	95,68	219	147	5,5	2055,03	15	6	20,43	1,88	14,56	0,13	0,06	0,70	0,08	0,68	3,29	62